

KARLOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Ochrana životního prostředí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelování znečištění povrchových vod v povodí Rakovnického potoka s využitím GIS

Modelling of surface water pollution in the Rakovnický brook water
basin using GIS

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Luboš Matějčík, Ph.D.

Autor:

Lenka Komárková

Srpen 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejaté) informace budou řádně citovány. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze, 10. 8. 2013

Podpis

Poděkování:

Tímto bych chtěla poděkovat Ing. Luboši Matějčkoví Ph.D. za poskytnutí cenných rad a odborné vedení diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala ČHMÚ, ČÚZP a VÚMOP za poskytnutí dat. Největší díky patří mé rodině za podporu po celou dobu studia.

Abstrakt:

Existuje řada hydrologických modelů se širokým spektrem použití. Díky svému rozvoji se v poslední době stávají významným nástrojem hydrologů, vodohospodářů a ekologů v operativním i návrhovém plánování. Vždy ale musíme brát v úvahu, že hydrologický model je jen zjednodušením celé komplexity systému a nelze v něm zahrnout všechny proměnné. Z tohoto důvodu je vhodné výsledky modelu porovnat s měřenými daty. Ve své práci jsem zvolila model SWAT, jelikož byl kladně hodnocen ostatními uživateli a je kompatibilní s programem ArcGIS 10.1..

Diplomová práce se zabývá využitím geografických informačních systémů (GIS) a programu SWAT (Soil and Water Assessment Tool) pro hodnocení znečištění povrchových vod Rakovnického potoka dusičnany v hydrologickém roce 1999 a 2000 s důrazem na bodové a plošné zdroje znečištění. Pro zpracování prostorových dat bylo využito programu ArcGIS 10.1. s podporou základních mapových vrstev ZABAGED a DIBAVOD a dále dostupných leteckých snímků a satelitních scén z družic LANDSAT. Tato diplomová práce navazuje na projekt GAUK, který probíhal na Rakovnickém potoce v letech 1998 - 2000 a jeho cílem bylo celkové zhodnocení fyzikálně - chemických parametrů Rakovnického potoka.

Model SWAT se ukázal být velmi náročným a citlivým na vstupní data. Povodí Rakovnického potoka je značně antropogenně ovlivněné, část toku byla vybetonována a napřímena. Po manuální kalibrace model poskytl výsledky rámcově shodné s měřenými daty, nelze ale očekávat přesný průběh hodnot z důvodu působení dalších faktorů.

Abstract:

There is a number of hydrological models with a wide range of applications. With its development, models have recently become an important tool for hydrologists, water managers and environmentalists in the design and operational planning. We have to bear in mind that it is only a simplification of the complexity of the system and it can not include all of the variables. For this reason it is appropriate to model results compared with the measured data. In my diploma thesis I chose SWAT model because it has been positively evaluated by other users and it is compatible with ArcGIS 10.1.

The diploma thesis deals with the use of geographic information systems (GIS) and modeling techniques based on SWAT (Soil and Water Assessment Tool) for evaluation of surface flows of nitrates in Rakovnický brook water basin in hydrological year 2000 with focus on point and non-point sources of pollution. For the spatial data is used ArcGIS 10.1 with the support of basic map layers ZABAGED and DIBAVOD and available aerial photographs and satellite scenes from LANDSAT. This diploma thesis draws on the project GAUK, which took place in the Rakovnický brook in years 1998 – 2000 and its aim was to evaluate total physical – chemical parameters of the Rakovnický brook.

Model SWAT has proved very difficult and sensitive to the input data. Rakovnický brook basin is highly anthropogenic influenced; part of the flow was concreted and straightened. After manual calibration model provided results generally consistent with measured data, but we can not expect the exact course of values, because of other factors.

Seznam použitých zkratk:

AGNPS – Zemědělský model nebodových zdrojů znečištění

Ann AGNPS – Kontinuální zemědělský model nebodových zdrojů znečištění

ANSWER – Model nebodových zdrojů znečištění s možností simulace odezvy

AV ČR – Akademie věd České republiky

BMP – nejlepší dostupné postupy/technologie

CASC2D – Model kaskád rovin ve 2D prostoru

CORINE – Koordinace informací o životním prostředí

CREAMS – Modelování chemikálií, odtoku a eroze v zemědělsky využívaných povodích

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

ČOV – Čistírna odpadních vod

ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální

DIBAVOD – Digitální báze vodohospodářských dat

DMT – Digitální model terénu

DMÚ 25 – Digitální model území z map 1:25 000

DPZ – Dálkový průzkum Země

DWSM – Dynamický model pro simulaci povodí

EPIS – Vliv klimatické změny na životní prostředí

ESRI – Výzkumný ústav životního prostředí

EUROSEM – Evropský půdně-erozní model

GIS – Geografický informační systém

GLEAMS – Vliv podzemní vody v zemědělských povodích

HEC-HMS – Hydrologický modelovací systém

HRU – jednotka hydrologické odezvy

HSPF – Hydrologický simulační program – Fortran

KINEROS – Model kinematického odtoku a eroze

KPÚ – Komplexní pozemková úprava

LISEM – Limburský půdně-erozní model

MUSLE – Modifikovaná univerzální rovnice půdní eroze

NASIM – Srážko-odtokový simulační model

PEZ – Populační ekvivalent znečištění

PRMS – Srážko-odtokový modelovací systém

SWAT – Nástroj pro hodnocení půdy a vodních zdrojů

SWIM – Integrovaný model půdy a vody

SWRRB – Simulace vodních zdrojů ve venkovských povodích

TIN – Nepravidelná trojúhelníková síť

USDA – Ministerstvo zemědělství Spojených států amerických

VÚMOP – Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd

WaSiM-ETH – Model simulující průtok vody

WHO – Světová zdravotnická organizace

ZABAGED – Základní báze geodetických dat

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Modelování povrchových vod	2
2.1	Vybrané hydrologické modely.....	5
2.2	Popis modelu SWAT	12
2.3	Aplikace modelu SWAT	14
2.4	Využití programu ArcGIS v hydrologickém modelování.....	18
2.5	Cyklus dusíku ve vodě.....	20
3.	Metodika	23
3.1	Příprava vstupních dat.....	23
3.2	Popis zájmového povodí.....	24
3.2.1	Geologická stavba povodí Rakovnického potoka	25
3.2.2	Fauna a flora Křivoklátska	27
3.2.3	Socioekonomická charakteristika oblasti	29
3.2.4	Popis odběrových profilů.....	30
3.3	Topografie	32
3.4	Hydrologie	35
3.4.1	Land use.....	36
3.4.2	Půdy a reliéf.....	37
3.4.3	Definice HRU.....	38
3.5	Meteorologie.....	39
3.6	SWAT simulace	42
3.6.1	Kalibrace	43
3.6.2	Výstupy	43
4.	Výsledky a diskuze	44
4.1	Varianta bez bodových a plošných zdrojů znečištění.....	47

4.2	Varianta s plošnými zdroji znečištění	48
4.3	Varianta s bodovými zdroji a hospodařením.....	50
5.	Závěr	55

1. Úvod

Znečištění povrchových vod patří mezi nejvýznamnější globální environmentální problémy. Dle WHO (2012) nemá asi 780 milionů lidí přístup ke kvalitní pitné vodě a 2,5 miliardě lidí chybí dostatečné hygienické zázemí. Ačkoliv již existují technologie pro odsolování mořské vody, není tato varianta pro mnoho rozvojových zemí z důvodu finanční a energetické náročnosti vhodná.

Česká republika se nachází v pramenné oblasti 3 evropských veletoků a nedostatek vody nepatří k nejpálčivějším problémům. U nás tvoří větší problém znečištění těchto vodních zdrojů, a to zejména sloučeninami dusíku, fosforu, těžkými kovy a pesticidy. Znečištění povrchových vod je způsobováno převážně průmyslem, zemědělstvím a socioekonomickým tlakem. Značné antropogenní změny jsou na vodních tocích vyvolávány hloubením betonových koryt, napřimováním toků, protipovodňovými opatřeními a hydromelioracemi. Vlivem těchto opatření se zvýšily průtokové rychlosti, snížila se samočisticí schopnost vody a zvýšilo se riziko povodní vlivem snížené retenční schopnosti koryta. To je i případ Rakovnického potoka. Ačkoliv tok protéká chráněnou krajinnou oblastí Křivoklátsko a přírodními parky Jesenicko a Džbán, řadí se mezi středně antropogenně ovlivněné z důvodu výše zmíněných antropogenních opatření.

Cílem mé diplomové práce bude modelování povrchového znečištění Rakovnického potoka dusičnany pomocí programu ArcGIS a modelu SWAT. Tento model se používá pro hodnocení dopadů zemědělského hospodaření na odtok, erozní procesy, transport plavenin a znečištění z plošných zdrojů. Celosvětově již vyšlo více než 5000 odborných prací založených na modelu SWAT a to hlavně na velkých a středně velkých povodích. Ve své práci se budu snažit aplikovat tento model na středně velké povodí Rakovnického potoka a součástí budou i případové studie, které odhalí citlivost tohoto modelu na změny zdrojů znečištění v povodí. Tato práce navazuje na práci Matějčka et al. (2003).

2. Modelování povrchových vod

Hydrologické modely mají širokou škálu použití, od vodohospodářského plánování, přes povodňové předpovědi po modelování kvality vod a slouží jako nástroj pro plánování hospodaření s vodními zdroji. Výsledky modelů jsou používány k posouzení vlivu navrhovaných scénářů land use a různých strategií hospodaření s vodou. Mezi využitím krajiny a jakostí vody existuje úzká souvislost, neboť vymývání živin z rozkladných procesů v půdě je významným zdrojem kationtů ve vodách. V souvislosti s modelováním kvality vody se hydrologické modely používají také jako cenný nástroj k uplatňování směrnice č. 91/676/EHS o ochraně vod před znečišťováním způsobeném dusičnany ze zemědělských zdrojů a Rámcové směrnice vodní politiky 2000/60/ES. Rámcová směrnice vodní politiky má za cíl zabránit zhoršení stavu vodních toků, chránit a zlepšit stav vodních ekosystémů a přilehlých mokřadů. Dále se zaměřuje na podporu udržitelného užívání vod a přispívá ke zmírnění následků záplav a období sucha.

Na rozdíl od terénního výzkumu, pomocí kterého je možné s určitou přesností zmapovat jednu konkrétní lokalitu, hydrologické modely umožňují komplexní pohled na celé povodí.

První hydrochemické modely se objevily v 70. letech minulého století v USA, jako odezva na Clean Water Act, který se zabývá eliminací znečištění vodních zdrojů. Jedním z prvních modelů byl model CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Managed Systems), který simuluje vliv managementu krajiny na sedimenty, pesticidy a nutrienty. Od tohoto modelu se odvozuje řada dalších modulů pro modelování vlivu pesticidů na podzemní vody nebo zabývající se vlivem eroze na produkci plodin (Leonard et al., 1987).

Dle Wheatera (2005) rozlišujeme 2 typy srážko–odtokových modelů:

- 1) *Deterministické modely*: popsány vztahem závislých proměnných (vstupní veličiny) a nezávislých proměnných (vstupní stavové veličiny). Existuje celá řada deterministických modelů, které se od sebe liší strukturou, fyzikálním přístupem či

diskretizací. Dle Kulhavého a Kováře (2002) jsou hlavními typy deterministických modelů:

- a) DL (Deterministic, Hydrodynamic Laws) – fyzikální popis srážko-odtokového procesu, respektují fyzikální zákony, tzv. „white box“ modely
- b) DC (Deterministic Conceptual) – fyzikální zákony ve zjednodušené formě i empiricky odvozené vztahy, tzv. „grey box“ modely
- c) DB (Deterministic Black-box) – empiricky odvozené vztahy, nezaložené na fyzikálních zákonitostech

2) *Stochastické modely*: vycházejí z pravděpodobnostního chování hodnocených proměnných

- a) SP (Stochastic Probabilistic) – pravděpodobnostní modely, hydrologické parametry jsou charakterizovány pravděpodobnostním rozdělením
- b) ST (Stochastic Time series generation) – generování časových řad

V praxi se často používá kombinace obou přístupů. Stochastická složka je přítomna ve většině modelů v oblasti plánování a projektování vodohospodářských staveb, ale i v dlouhodobé hydrologické předpovědi (Daňhelka et al., 2003). V současné době převažuje deterministický přístup, lze však velmi obtížně postihnout všechny vstupní parametry a proměnné. Každý model je zatížen určitou chybou, která je složena z vlastních chyb modelu a chyb měřených veličin.

Daňhelka et al. (2003) dělí modely dle délky období simulace na:

- 1) *Epizodní (událostní modely)*: jsou určeny k vyjádření odtoku nebo odnosu za jednu srážko-odtokovou událost. Tento typ modelu bývá nenáročný na vstupní data vzhledem k zanedbání některých hydrologických a hydrochemických procesů kvůli krátkému časovému úseku simulace.
- 2) *Kontinuální modely*: modely s dlouhou dobou simulace vhodné pro větší povodí. Výhodou je lepší podchycení vstupních podmínek lokality.

Dále je možno hydrologické modely dělit podle Jeníčka (2009) dle prostorového členění na modely:

- 1) *Celistvé (lumped)*: charakteristiky povodí jsou vztahovány k celému nebo dílčímu povodí. Protože se většinou jedná o bodově měřené hodnoty (srážky na meteorologické stanici nebo průtoky v závěrovém profilu), využívají se geostatické metody k převedení na hodnoty plošné, př. model HEC – Hydrologic Engineering Centre.
- 2) *Distribuované modely*: celé povodí je pomocí sítě (gridu) rozděleno na elementární odtokové plochy o velikosti max. 1 km. Každé pole má svou vlastní hodnotu parametru. Patří sem např. model AGNPS.
- 3) *Semi-distribuované modely*: povodí je rozděleno na elementární odtokové plochy jako v předcházejícím případě, na rozdíl od distribuovaných modelů mají ale homogenní prostorové parametry – př. stejný druh půd, reliéf, vegetace. Mezi semi-distribuované modely patří model SWAT, MIKE-BASIN.

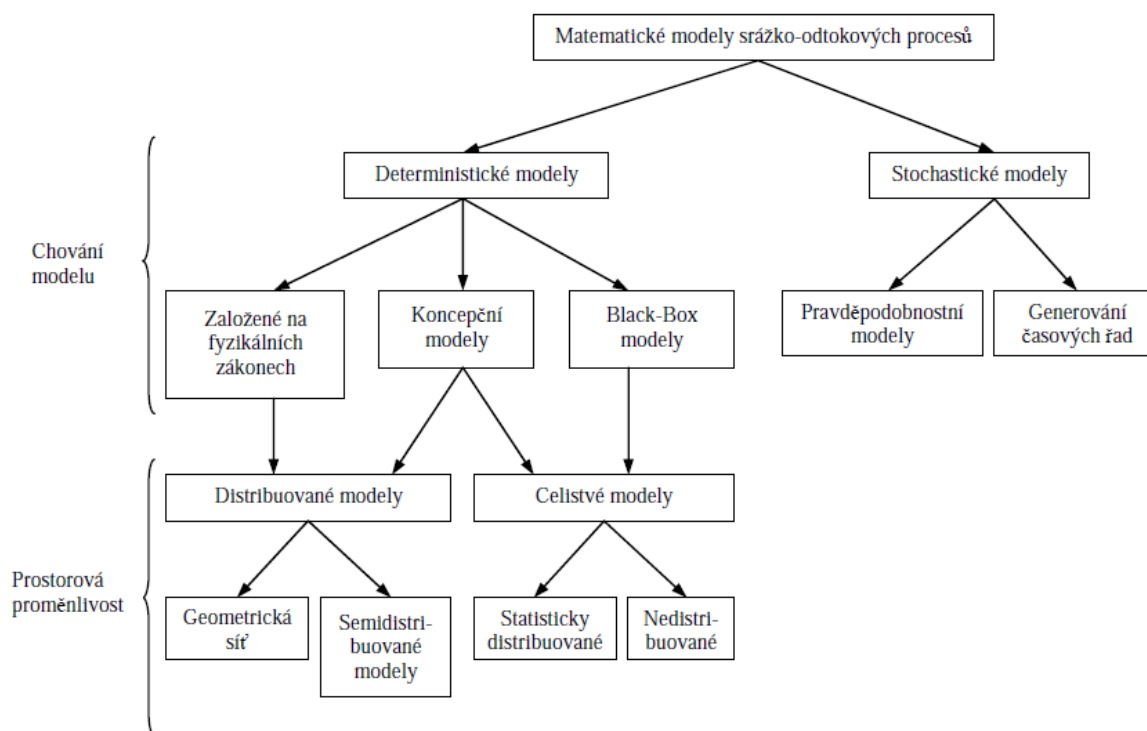
Hydrologické modely lze také využít v operativní hydrologii k predikci výšky povodňové vlny – např. systém FFS Flood Forecast System. Spolu s programem GIS lze vytvořit důvěryhodnou mapu záplavových území a na základě toho zvolit vhodná protipovodňová opatření. ČHMÚ používá k hydrologické předpovědi povodní modely AquaLog (povodí Labe) a Hydrog (povodí Odry a Moravy, více v kapitole 2.1 Vybrané hydrologické modely). Další hydrologické využití je např. ke stanovení hydrologické bilance či výpočtu průtoků.

Hydrologické modely se používají i k odhadu možných jevů v povodí jako důsledek klimatické změny. Hagemann et al. (2009) uvádí, že globální klimatická změna bude mít velký vliv na vodní zdroje v místním, regionálním i celosvětovém měřítku. Změny v dostupnosti a rozložení srážek budou mít velký vliv na odtokové poměry a dostupnost vody, zatímco změny teploty a radiace se projeví změnou evapotranspirace.

Využívání půdy a změna krajinného pokryvu souvisí kromě změny klimatu ještě se socio-ekonomickými hnacími silami a s dynamikou ekosystémů. Zahraniční studie dokázaly, že odlesňování, urbanizace a další jevy mohou výrazně ovlivnit sezónní a roční hydrologický chod.

Model kvality vody je soubor matematických rovnic vyjadřujících fyzikální, biologické a chemické procesy probíhající ve vodním toku. Látková bilance je počítána podle množství vstupujících látek do vodního toku, jejich přeměny a transportu do navazujícího úseku za

daný čas. Transport látky probíhá buď advekci u vodních toků či disperzí u vodních nádrží a estuárií s malou rychlostí proudění.



Obr. č. 1: Klasifikace hydrologických modelů (Becker, 1990)

2.1 Vybrané hydrologické modely

Níže uvedené hydrologické modely, řazené dle abecedy, patří k nejvýznamnějším.

1) AGNPS

Model AGNPS (Agricultural NonPoint Source Pollution Model) byl vyvinut v USDA (United State Department of Agriculture) centru pro ochranu a výzkum půd v Minnesotě. AGNPS je epizodní model simulující povrchový odtok, transport splavenin a živin v zemědělsky využívaném povodí o velikosti do 200 km². Z živin jsou počítány dusík a fosfor jako hlavní zdroje znečištění povrchových vod. Kromě plošných zdrojů znečištění lze do modelu vložit i bodové zdroje eroze a chemického znečištění (Young et al., 1989). Povodí je čtvercovou sítí rozděleno na základní

homogenní jednotky. Zvláštností modelu je možnost modelování chemické spotřeby kyslíku.

2) AnnAGNPS

Vylepšením a úpravami předchozího modelu došlo ke vzniku nového modelu s názvem AnnAGNPS – Annualized Agricultural NonPoint Source Pollution Model. AnnAGNPS je kontinuální model pro předpověď povrchového odtoku, odnosu plavenin, dusíku, fosforu a pesticidů ze středně velkého povodí v denním časovém kroku. Tento model byl vytvořen pro zjištění vlivu nebodových zdrojů znečištění na životní prostředí hlavně v zemědělsky využívaných povodích. Z časového hlediska umožňuje model simulaci s denním i hodinovým krokem. Model je založen na homogenních krajinných celcích. Základem hydrologického submodelu je empirická metoda CN-křivek. Curve number čili odtoková křivka vyjadřuje závislost denní výšky přímého odtoku na denním úhrnu srážek. CN nabývá hodnot od 40 do 100, při čemž 99 mají nepropustná parkoviště, kde nedochází k infiltraci (Binger, Theurer, 2001).

3) ANSWER

Areal NonPoint Source Watershed Environment Response Simulation model popsal Beasley et al. (1980) a byl vyvinut na univerzitě v Luisianě. Tento model se používá k simulaci prostorové proměnlivosti odtoku, infiltrace, podpovrchového odtoku a erozních procesů pro časový úsek jedné srážkové epizody. Model ANSWER popisuje jak hydrologii, tak erozní odezvu na srážkový úhrn. Povodí je rozděleno pravidelnou čtvercovou mřížkou.

4) CASC2D

Cascade of planes in 2-Dimensions je model vytvořený Univerzitou v Coloradu. Je to fyzikálně zaměřený model, který simuluje průtok a odnos sedimentů v rámci dvojdimenzionální nadzemní mřížky. Časový krok lze nastavit uživatelem.

5) DesQ – MaxQ

Prof. Hrádek (2001) použil model DesQ-MaxQ pro stanovení návrhových charakteristik povodňových vln v nepozorovaných profilech malých povodí vyvolaných přívalovými dešti a pro výpočet ovlivnění maximálních průtoků a objemů povodňových vln změnou charakteristik povodí.

6) DWSM

Semi-distribuovaný Dynamic Watershed Simulation Model popsáný Borah et. al (2002) simuluje proudění povrchové a podpovrchové vody při bouřkách, postup povodňových vln, erozní procesy, transport sedimentů a chemických sloučenin ze zemědělské činnosti v průběhu jediné srážky. Časový krok může být nastaven uživatelem. Výpočet průtokových charakteristik je založen na metodě CN křivek. Výpočet odnosu látek probíhá prostřednictvím upravené rovnice kontinuity.

7) EUROSEM

European Soil Erosion Model byl vytvořen k predikci vodní eroze z jednotlivých polí a malých povodí. Tento epizodní model předpokládá několik srážko-odtokových událostí za rok. Jedná se o dynamický model, který umožňuje přesně popsat transport částic půdy i jejich ukládání v sedimentu.

8) HYDROG

Srážko-odtokový model HYDROG byl vyvinut pro potřeby simulace odtoku z povodí s nádržemi (ČHMÚ, 2012). Po napojení na srážkoměrné stanice lze v reálném čase předpovídat průtok v libovolném profilu povodí. V ČR je model používán ČHMÚ na povodí Moravy, Ohře a Odry.

9) HEC-HMS

HEC-HMS je simulační program vyvinutý Hydrologic Engineering Center sloužící k modelování srážko-odtokových procesů (Hydrologic Modeling System HMS). Jedná se o celistvý model se soustředěnými parametry vyvíjený od 60. let americkou armádou. Generačně vyšší verzí je nadstavba WMS – Watershed Modeling System, který lépe spolupracuje s programem GIS. Výhodou HMS je jeho bezplatné šíření po internetu, WMS je šířen komerčně.

10) HSPF

Pod americkou EPA (Environmental Protection Agency) vznikl kontinuální model Hydrological Simulation Program – Fortran (Johanson et al., 1980). Model je určen pro simulace dlouhodobého managementu živin a pesticidů v povodí s konstantním časovým krokem. Tento model byl začleněn do modelu BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources). Výpočet transportu látek je založen na empirických rovnicích zahrnujících především rychlost proudění.

11) LISEM

Limburg Soil Erosion Model je fyzikálně založený model určený k modelování erozních procesů. Díky prostorové a časové variabilitě odtokových a transportních procesů je pro hydrologické modelování užitečným nástrojem prostředí GIS.

12) KINEROS

Smith et al. (2005) popsal Kinematic Runoff and Erosion Model jako model sloužící k simulaci srážko-odtokových vztahů a erozního transportu sedimentů v rámci jedné srážko-odtokové epizody. Časový krok modelu je variabilní.

13) KINFIL

Model Kinfil, vyvíjený Českou zemědělskou univerzitou v Praze, využívá fyzicko-geografických charakteristik povodí a hydraulických vlastností půdy získaných buď přímým měřením, nebo analýzou mapových podkladů (Kovář et al., 2006). Díky tomu může být model použit i v povodích, kde není možný pravidelný monitoring. Model je určen k odvození kulminačních průtoků s různými vstupními podmínkami – např. land use (urbanizace, odlesnění, atd.).

14) MIKE SHE

Srážko-odtokový model MIKE-SHE patří do skupiny distribuovaných, případně semi-distribuovaných modelů. Model vyvinutý European Hydrologic System simuluje proudění vody, transport sedimentů a parametry jakosti vody. Tento model je založen na sčítání jednotlivých komponent, které způsobují vodní erozi. Jeho velkou výhodou je provázanost se systémem GIS, s jehož pomocí lze řešit širokou škálu hydrologických úkolů, např. analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou a řešení technických zásahů v povodí (DHI, 2010).

15) NASIM

Srážko-odtokový model vyvíjený německou firmou Hydrotec GmbH – Niederschlag-Abfluss Simulation Model – slouží jako nástroj pro podporu hydrologů a ekologů při plánování širokého spektra vodohospodářských systémů a pro hydrologickou předpověď (Hydrotec, 2003). Model je nejvíce využíván na území Spolkové republiky Německo, např. v aplikovaném výzkumu. Jeho využití za hranicemi je komplikováno těsnou vazbou na německé datové zdroje a specifické formáty dat (Schulte et al., 2007).

16) PRMS

Precipitation-Runoff Modeling System popsal Leavesley et al. (1983). PRMS modeluje vliv srážek, klimatických charakteristik a land use na povodí. Reakce povodí na běžné i extrémní srážky nebo tání sněhu jsou pozorovány prostřednictvím simulace odtoku, popisu povodňových vln, vlhkostní charakteristiky půdy, podzemního odtoku a odnosu sedimentů.

17) SACRAMENTO

Sacramento-Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) je srážko-odtokový model, který byl vyvíjen od 70. let národní meteorologickou službou (NWS) v USA a je součástí větších předpovědních systémů. V České republice je součástí předpovědního systému Aqualog, který zajišťuje předpověď pro povodí Labe a Vltavy. Celý systém je provázán s dalšími komponenty, jako jsou sněhový model SNOW17, korytový model TDR a řízení nádrží MAN (Reed et al. 2004).

18)SWAT

Model SWAT – Soil and Water Assessment Tool popsali Arnold et al. (1998) a Neitsch et al. (2005). Tento model byl vyvinut v U.S. Department of Agriculture – Agricultural Research Service v Texasu. SWAT patří mezi semi-distribované modely s denním časovým krokem, který modeluje vliv managementu povodí na vodu, sedimenty a chemické látky v lokalitách s většími výměrami.

Nejčastěji je model využíván v USA jako nástroj pro implementaci programů TDML (Total Daily Maximum Load) (Gassman a Jha, 2005), které mají za cíl návrh opatření na ochranu povrchových vod před znečištěním z bodových a plošných zdrojů. V Evropě je model SWAT jedním z doporučených nástrojů pro uplatňování cílů rámcové směrnice vodní politiky EU 2000/60/EC umožňující predikci dopadů zemědělského managementu na bilanci sedimentů, polutantů a živin ve vodním prostředí (WFD, 2000).

19)SWIM

Institut pro výzkum dopadů klimatu v Potsdami se podílí na vývoji modelu SWIM – Soil and Water Integrated Model. Tento model je určen k modelování hydrologického cyklu, eroze, růstu vegetace a transportu živin ve středně velkých povodích. Model SWIM je také možné použít pro modelování regionálních dopadů změn klimatu na hydrologické systémy. V ČR je model používán např. ústavem hydrodynamiky AV ČR (Košková, Němečková, 2009).

20)TOPMODEL

Tento model je vyvíjen na Institutu environmentálních a přírodních studií v Lancasteru. K predikci distribuovaných odtoků a půdní vlhkosti používá topografické informace. Model vyžaduje kvalitní model terénu a jeho výhodou je možnost integrace do GRASS GIS.

21) WaSiM-ETH

Water Flow and Balance Simulation Model je deterministický model, na jehož vývoji se podílel švýcarský Institut atmosféry a klimatu v Curychu. Je využitelný pro široký rozsah prostorových měřítek od méně než 1 km² až do 10 000 km². Tento model by měl představovat kompromis mezi podrobným fyzikálním popisem povodí a nároky na vstupní data.

Výběr vhodného modelu závisí dle Jeníčka (2009) na 5 hlavních kritériích:

- Aplikovatelnost v daných fyzicko-geografických podmínkách
- Velikost povodí
- Dostupnost a množství vstupních dat
- Vazba na programy pro zpracování dat, grafické výstupy (ArcGIS 10.1)
- Dostupnosti modelu (komerční/bezplatný)

Na základě výše uvedených kritérií byl vybrán kontinuální model SWAT. U ostatních modelů je popisována možná nespolehlivost pro takovou velikost povodí či nekompatibilita s programem ArcGIS.

2.2 Popis modelu SWAT

SWAT je kontinuální semi-distribuovaný model povodí, který pracuje s denním časovým krokem. Vytvořen byl k predikci vlivu managementu na hydrologii, sedimenty a chemické látky spojené se zemědělskou činností. Hlavní komponenty modelu zahrnují počasí,

hydrologii, pedologii, růst rostlin, nutrienty, pesticidy a krajinný management (Neitsch et al., 2009).

Model SWAT se ukázal jako efektivní nástroj pro posuzování vydatnosti a jakosti vodních zdrojů a problémů s nebodovými zdroji znečištění v měřítku ucelených povodí (Arnold et al., 1998).

Vývoj modelu SWAT začal před 30 lety a jeho platformu tvoří programy CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) a EPIS (Environmental Impact Policy Climate). SWAT model je nástupcem modelu SWRRB - Simulation for Water Resources in Rural Basins.

Model SWAT prodělal ve svém vývoji mnoho softwarových změn a vylepšení, které se odrazily v jeho verzích SWAT 94.2, 96.2, 98.1, 99.2, 2000, 2005, 2009. Nejaktuálnější verze je z dubna tohoto roku – SWAT 10.7. Tento software jsem využila ke své práci i já.

Mezi velké výhody modelu SWAT patří to, že je volně dostupný a často dochází k jeho aktualizacím. Mezi 4 nejvýznamnější modifikace SWAT patří:

- ESWAT (Extended SWAT) – oproti klasickému SWAT lze zvolit i menší než denní časový krok, který je individuálně nastavitelný.
- SWAT-G – obsahuje upřesnění hydrologických dat – průsak, hydraulická vodivost a proudění. Určeno primárně pro zalesněná podhorská povodí v Německu (G), kde odtok tvoří hlavně hypodermický odtok a nasycený povrchový odtok. Dále došlo k vylepšení výpočtu erozního smyvu.
- SWIM – určen pro velká povodí. Vylepšení spočívá v zahrnutí submodelu pro dynamiku podzemní vody, upravené modelování lesních povodí, mokřadů a pobřežní zóny. Krysanová et al. (2005) provedla rozsáhlou verifikaci modelu v Německu na povodí Labe a zjistila, že model dává pro velké území s rozdílnými geografickými podmínkami realistické výsledky. Vypočtené a měřené průtoky se nejlépe shodovaly v horských oblastech s vysokými úhrny srážek, horší výsledky model poskytoval v suchých oblastech. Autoři doporučují při verifikaci modelu vyhodnotit jak průtok,

plaveniny a živiny tak i půdní vlhkost, hladinu podzemní vody, vodní hodnotu sněhu a výnosy zemědělských plodin.

- SWATMODE – primárně určen pro proudění podzemní vody.

Mezi hlavní komponenty modelu patří tzv. HRU – Hydrological Response Unit. Jsou to homogenní prostorové celky se stejným chováním – např. land use, půdním pokryvem. Infiltrace je vypočtena metodou SCS CN křivek nebo Green-Ampt. Metoda SCS CN křivek (Soil conservation service) slouží k výpočtu odtoku při srážkoodtokové události pomocí CN křivek, které reprezentují dané povodí (land use, půdní poměry, atd.). Půdní profil může být rozdělen do max. 10 vrstev. Výpočet povrchového odtoku vychází z metody jednotkového hydrogramu dle SCS. Pro transport využívá model modifikovanou rovnici USLE – MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). Pomocí dalších metod mohou být do modelu začleněny výpočty vlivu nádrží, zavlažování a transportu živin a znečišťujících látek (Arnold et al., 2007).

Model umožňuje manuální i automatickou kalibraci parametrů. Výhodou ArcSWAT je jeho kompatibilita s nástroji pro zpracování grafických dat pomocí programu GIS, z nichž nejdůležitější je ArcGIS 10.1., GRASS GIS a ArcView. Speciálně pro model SWAT byly vyvinuty podpůrné nástroje, např. AUTORAN pro citlivostní analýzu či iSWAT sloužící k automatické kalibraci modelu.

2.3 Aplikace modelu SWAT

Aplikace modelu SWAT se za posledních 10 let rozšířila do celého světa. Mnohé z těchto aplikací byly podmíněny potřebami vládních agentur či Evropské unie, kde bylo třeba odhadnout vliv antropogenních a klimatických změn na vodní zdroje.

V současné době lze použití modelu SWAT shrnout do 9 kategorií, kterými jsou: kalibrace a citlivostní analýza, vliv klimatických změn, propojení modelu s rozhraním GIS, hydrologické modelování, rozdíly v konfiguraci a efekt vstupních dat, porovnání s jiným modelem, propojení s dalšími modely, modelování polutantů. Má práce by se dala zařadit do kategorií propojení s modelem GIS a modelování polutantů v povodí. Tomuto tématu se věnuje spousta autorů v USA, např. Di Luzio et al. (2002), který porovnával modelované a měřené hodnoty

celkového dusíku a fosforu na Boque River v Texasu. Autoři došli k závěru, že model poskytuje realitě blízké výsledky s E větším než 0,78 (Nash – Sutcliffe koeficient účinnosti předpovědi, více v kapitole 3.6.2 Výsledky). Dále byly studie o modelování ztrát dusíku a fosforu z povodí prováděny v Číně, Indii a ve Finsku na řece Vantaajoki (Bouraoui et al., 2004). Všechny studie vedly k uspokojivým výsledkům. Nejlepší korelace byly zjištěny pro modelování dusičnanů, horší data model poskytuje pro amoniak. V ČR byl model AVSWAT 2000 testován v rámci projektu EUROHARP (2009) v povodí Želivky. Želivka tvoří zdroj vody pro největší českou vodárenskou nádrž, a proto je zde důležité redukovat znečištění povrchových vod z bodových i plošných zdrojů. Autoři popisují dobrou shodu mezi měřenými a simulovanými hodnotami, avšak ke konci sledovaného období model lehce podhodnocoval roční koncentrace. Celková simulovaná bilance N v půdě byla odhadnuta na 29 kg/ha za rok, při čemž 21 kg z tohoto množství je denitrifikováno. Biologická fixace byla odhadována na 22 kg/ha za rok a vyluhování do podzemních vod na 3 kg/ha za rok. Celkové zdroje, koncentrace a zatížení dobře korespondují s měřenými hodnotami. Jako nedostatek modelu autoři hodnotí kolísání podzemní vody, jelikož nejsou k dispozici data půdních charakteristik v hlubších vrstvách a zároveň je měření zde nedostačující. Model zobrazuje klesající trend v odtoku nutrientů jako výsledek jejich nižšího vstupu. Lepších výsledků by mohlo být dosaženo, kdyby se daly blíže specifikovat parametry, jako jsou aplikace hnojiv a střídání plodin. Posledním negativem modelu, který se v projektu EUROHARP projevil, jsou parametry podzemní vody. Tyto hodnoty model jen velice obecně odhaduje, jelikož chybí místní měření.

Velmi obsáhlou studií bylo modelování kvality vod pomocí programu SWAT v Africe na řece Limpopo (Querner, Zanen, 2013). Cílem tohoto projektu bylo využití modelu pro analýzu zemědělského managementu v povodí a jeho vliv na hydrologii. Autoři hodnotí program kladně, jelikož jsou všechny fyzikální procesy zahrnuty do modelu. Záporně hodnotí náročnost na vstupní data.

V současnosti se model SWAT zkouší v několika dalších afrických zemích. Cílem je ověřit použitelnost modelu v podmínkách, kde jsou jen velmi omezená data, která převážně pochází z DPZ. Největší území, kde byl prozatím model SWAT testován je povodí řeky Niger, které má plochu cca 2 mil km². Toto povodí je hydrologicky abnormální, jelikož je v severní části ohroženo desertifikací a úbytkem vodních zdrojů. Dle Schuola a Abbasoura (2006) zde poskytuje model SWAT po automatické kalibraci velmi dobré výsledky.

Řada studií je zaměřena na porovnání modelu SWAT s jinými hydrologickými a erozními modely. Porovnáním semi-distribovaných modelů SWAT a HSPF s distribuovaným modelem SHETRAN v Irsku vyšlo najevo, že po provedení kalibrace poskytují všechny modely srovnatelné výsledky (Nasr et al., 2006).

Práce Grizzettiho et al. (2005) se zabývá porovnáním statistického přístupu s fyzikálně založeným modelem SWAT ve Velké Británii na řece Wash. Povodí řeky Wash má rozlohu 8 900 km² a nachází na východním pobřeží Velké Británie v nížinné oblasti. Podobně jako u Rakovnického potoka, tvoří i zde zemědělská půda přibližně 55 % rozlohy povodí. Ve sledované oblasti tvoří průměrný vstup veškerého dusíku dodávaného do půdy pomocí hnojiv celkem 147 kg/ha. Model SWAT byl na zájmovém povodí porovnáván se statistickým modelem inspirovaným metodologií SPARROW. Tento přístup se skládá z nelineárních regresních rovnic, kdy je celkové zatížení dusíkem rozděleno na dílčí zdroje, kterými jsou: hnojiva, atmosférická depozice a bodové zdroje znečištění. Tyto hodnoty jsou pak sníženy o retenční procesy ve vodě a v půdě. Po provedené kalibraci obou modelů autoři došli k závěru, že oba modely poskytují pro sledovanou oblast přibližně stejné hodnoty celkového zatížení dusíkem, avšak oba modely tuto hodnotu lehce podhodnocují. V případě modelu SWAT to může být způsobeno nižšími hodnotami vstupních hnojiv, se kterými probíhala parametrizace.

Model SWAT byl použit také ke kvantifikaci vlivu klimatu, land use a managementu na tok dusičnanů ve Francii na řece Oudon o rozloze povodí 1 310 km² (Laurent, Ruelland, 2011). Snahou autorů bylo dokázat značný vliv využívání krajiny a zemědělských praktik na znečištění vodních toků. Ke snížení tohoto zatížení doporučují využívat tzv. BMP (Best Management Practices) jako jsou vysazování meziplodin, redukce hnojiv, přeměna orné půdy na pastviny a bezorebné technologie. Díky využívání BPM se autorům podařilo na zájmovém území dokázat, že díky redukci hnojiv se snížil tok dusičnanů o 19 %, meziplodiny snížily množství dusičnanů o 13 % a bezorebné technologie se podílely na zlepšení stavu o 14 %. Naopak přeměna pastvin na oblasti pěstování obilovin a řepky vedly ke zvýšení toku dusičnanů o 21 %. Tento výsledek může být použit k odhadu jednotlivých opatření na kvalitu vody ve vodních tocích.

Článek Pisinarase et al. (2010) se zabývá modelováním kvality vody a hydrologickým modelováním modelem SWAT 2005 a rozhraním AVSWATX na řece Kosynthos v severovýchodním Řecku. Povodí o rozloze 440 km² bylo rozděleno na 32 subpovodí a

celkem 135 hydrologických jednotek (HRU). Kalibrace a verifikace proběhla využitím meteorologických dat ze 3 stanic, odtok a koncentrace dusičnanů byly měřeny kontinuálně v letech 2003 až 2006 na 4 monitorovacích místech. Výsledky kalibrace a verifikace prokázaly dobrou shodu mezi měřeními a modelovanými výsledky. Zhodnocení bylo provedeno Nash-Sutcliffe koeficientem účinnosti předpovědi (popsán v kapitole 3.6.2 Výsledky). Bylo také zvoleno několik typů land use a pěstování plodin. Studie prokázala, že model SWAT je účinný nástroj k odhadnutí testování různých druhů managementu na povodích ve Středomoří. Díky podpoře GIS technologií lze model využít jaké jako spolehlivý a pružný nástroj při vodohospodářském plánování a k uplatňování Rámcové směrnice vodní politiky 2000/60/ES.

V rámci České republiky byl model SWAT využit Českou geografickou společností na projekt Modelování transportu sedimentů v malých beskydských povodích (Šír et al., 2010). Modelovaným povodím byl malý tok Červík o ploše povodí 9,3 km². Koeficient determinace vyšel v dané práci signifikantní, pro lepší výsledky ale autoři doporučují: opatřit si více dat z terénních průzkumů a upřesnit statistické datové vstupy. Vysoká komplexnost modelu je kompenzována vysokou náročností na vstupní data.

Kadlec (2007) využil model v rámci práce o modelování erozních procesů v povodí Blšanky. Ve své práci porovnával výsledky modelů AnnAGNPS a model SWAT. Z výsledků vyšlo najevo, že průtoky vypočtené modelem SWAT se na rozdíl od AnnAGNPS lépe shodují s pozorováním v povodí Blšanky. Podrobnější rozbor ukázal, že výrazné nadhodnocení průtoku je způsobeno výskytem hluboko zmrzlé půdy, která dle modelu zabraňuje infiltraci a převážná část srážek odtéká po povrchu jako povrchový odtok. Jako další negativum modelu autor hodnotí neuspokojivou simulaci odtoku během přívalových srážek po předchozím suchém období. Model událost popisuje tak, že se veškerá srážková voda infiltruje a zvýšení průtoku je zanedbatelné až nulové. Výhodou modelu SWAT je dle Kadlece kvalitní dokumentace, technická podpora a funkční uživatelské rozhraní.

Práce Moravcové (2011) na téma Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ byla také doplněna o modelování za pomoci SWAT. Autorka modelovala vliv uspořádání jednotlivých prvků krajinné struktury v rámci povodí Jenínského a Kopaninského potoka na vývoj průtoků a koncentrace dusičnanových aniontů. Závěrem byl fakt, že zatravnění i zalesnění lokalit působí pozitivně

na odtok a koncentrace dusičnanových aniontů. V obdobích nejvyšších průtoků dochází k podhodnocování modelované datové řady oproti měřeným datům. Po ukončení kalibrace a validace průtoků a koncentrace dusičnanových aniontů došla autorka k výsledku 77% shody mezi měřeními a modelovanými daty.

Většina autorů se shoduje, že pro použitelnost modelu SWAT je nutná kalibrace. Kalibrace hydrologických parametrů vede ke zvýšené spolehlivosti předpovědi průtoků, obsahu plavenin, dusičnanů i fosforu.

Model SWAT se nedá využít k hydrologické předpovědi na všech povodích. Jako nevhodný se ukázal ve Švédsku v povodí řeky Ronnea. Tato řeka je značně ovlivněna jarním táním sněhu, a proto i po kalibraci model není schopen simulovat tání sněhu při výskytu zmrzlé půdy.

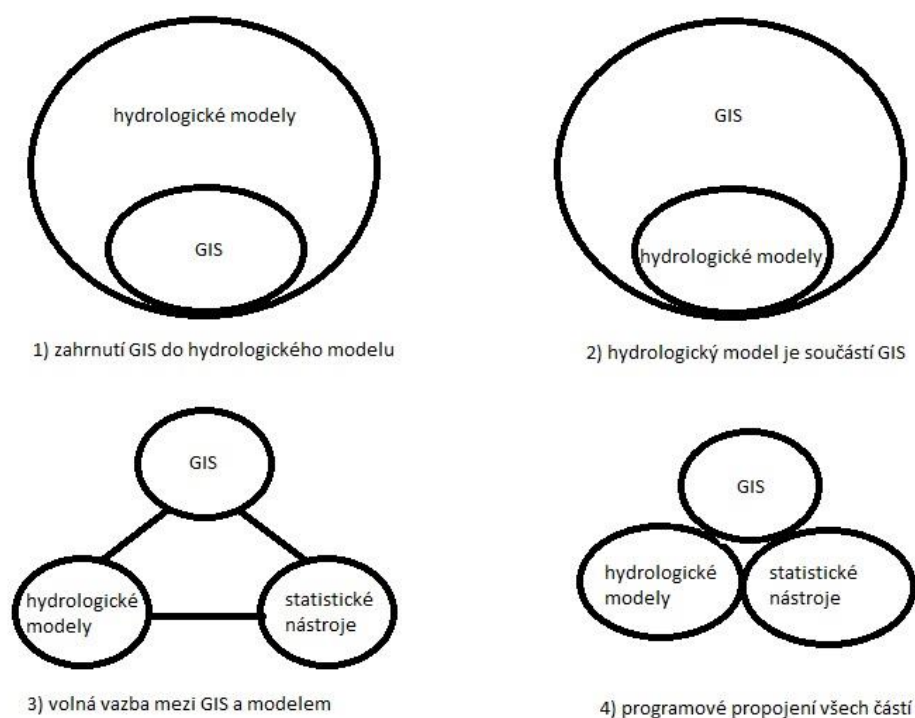
2.4 Využití programu ArcGIS v hydrologickém modelování

Geografické informační systémy lze definovat jako funkční celky vytvořené za účelem integrace technických a programových prostředků, dat a pracovních postupů, obsluhy, uživatelů a organizačního kontextu. Jsou zaměřeny na sběr, ukládání, správu, analýzu, syntézu a prezentaci prostorových dat pro potřeby popisu, analýzy, modelování a simulace okolního světa za účelem získat nové informace (Maguire et al., 2005). Programy GIS mají široké uplatnění, např. při tvorbě klimatických map, analýze změny klimatu, mapování povodňových rizik a v neposlední řadě v modelování hydrologických a erozních procesů. Ve své diplomové práci jsem pracovala hlavně s nástavbou programu GIS – ArcGIS 10.1, který byl vyvinutý firmou ESRI (Environmental System Research Institute). ArcGIS 10.1 je nejnovější řadou softwaru ArcGIS patřící do kategorie ArcGIS Desktop.

Program ArcGIS ve spojitosti s hydrologickým modelováním použít k:

- Přípravě dat – *pre-processing*
- Výpočtu modelem
- Zpracování dat – *post-processing*

Dle Sui a Maggio (1999) existují v současné době 4 hlavní přístupy k propojení GIS a hydrologických modelů. První přístup spočívá v zahrnutí GIS do hydrologického modelu, čímž je umožněno v prostředí modelu zpracovávat prostorová data. To je případ např. modelu WMS. Druhou možností je jev, kdy je hydrologický model součástí GIS. Zahrnutí výpočetního procesu do prostředí GIS však není výhodné, vývoj směřuje k vyvíjení dílčích nástrojů GIS pro zpracování časových a prostorových dat. Příkladem jsou produkty firmy ESRI – GeoHMS či ArcHydro. Třetím typem je tzv. volná vazba mezi GIS a modelem. Tento typ vazby nevykazuje žádné programové propojení mezi GIS a konkrétním modelem. Opakem je pak těsná vazba, kdy mezi modelem a GIS existuje programové propojení mezi jednotlivými částmi.



Obr. č. 2: Typy vazeb mezi GIS a hydrologickými modely (Sui, Maggio, 1999)

ArcGIS slouží i jako nástroj k úpravě následujících kroků v programu SWAT:

- Platforma ArcSWAT extension
- Vymezení povodí a definice HRU
- Úpravy databáze SWAT (volitelné)

- Definice meteorologických dat
- Využití výchozích vstupních souborů díky shodnému formátu dat
- Úprava vstupních souborů (volitelné)
- Nastavení délky simulačního období
- Nástroj pro kalibraci (volitelné)
- Analýza a vizualizace SWAT výstupů (volitelné)

2.5 Cyklus dusíku ve vodě

Dusík je jedním z biogenních prvků, který je nezbytný pro tvorbu biomasy a pro funkci všech buněk v organismu. Komplexita dusíkového cyklu a jeho nezbytnost pro růst z rostlin z něj dělají jeden z nejčastějších objektů vědeckého výzkumu. Dusíkový cyklus je dynamický systém, který v sobě zahrnuje vodu, atmosféru a půdu.

Dusík je nezbytnou součástí RNA a DNA, chlorofylu, chitinu a buněčných stěn. V povrchových vodách může nadměrné množství dusíku a fosforu způsobovat eutrofizaci, a to především jejich dodáváním do prostředí ve formě hnojiv a vypouštěním odpadních vod. Ve vodách se dusík vyskytuje v různých oxidačních stupních. Celkové množství dusíku se dělí na organicky a anorganicky vázaný dusík. Anorganicky vázaný dusík se nachází ve formě amoniakální, dusitanové či dusičnanové. Formy dusíku ve vodách určují nitrifikační a denitrifikační bakterie, jejichž množství je ovlivněno teplotou a dostupností kyslíku (Pitter, 2009).

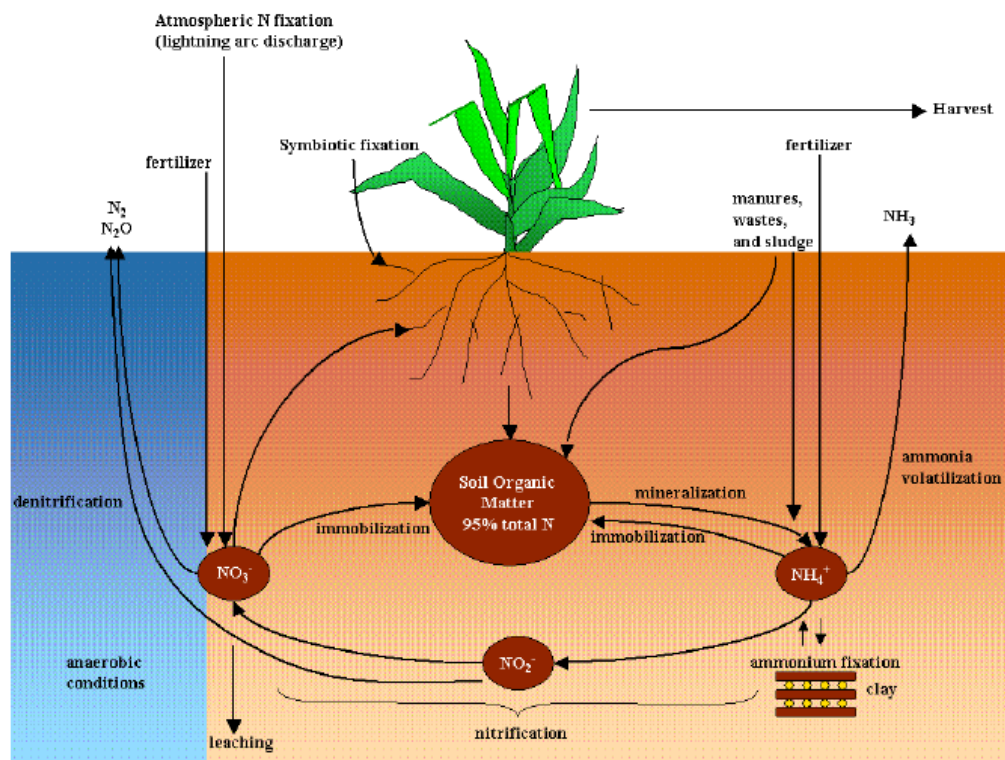
Cyklus dusíku popsali Šimek a Cooper (2003) následovně: plynný dusík je procesem mikrobiální fixace redukován na amoniak, který je asimilován do biomasy. Procesu, kdy je dusík z biomasy uvolňován do atmosféry se říká volatilizace. Případně může být z biomasy přeměněn na jinou oxidovanou nitrátovou formu (NO_3^-) nitrifikací. Opačný proces se nazývá denitrifikace a spočívá v redukci dusíku na formu nitritovou (NO_2^-) a dále postupujícím procesem až na molekulární dusík (N_2). Tento proces je příčinou největších ztrát dusíku z povodí.

Pohyb dusíku ve vodách je primárně uskutečněn ve formě dusičnanů díky vysoké rozpustnosti tohoto iontu. Dusičnany jsou konečným produktem mineralizace organicky vázaného dusíku a za oxických podmínek jsou stabilní, za anoxických podléhají denitrifikaci za vzniku elementárního dusíku. Dusičnany (NO_3^-) se vyskytují téměř ve všech povrchových vodách a jsou hlavními ionty spolu s fosforečnanovými (PO_4^{3-}), hydrogenuhličitanovými (HCO_3^-) a síranovými anionty (SO_4^{2-}). V důsledku vzrůstajícího počtu obyvatel a intenzifikace zemědělství v posledních desetiletích koncentrace dusičnanů v povrchových vodách vzrostly (Burt et al., 1988). Chapman (2007) poukazuje na změny koncentrací dusičnanů ve vodách v závislosti na vegetačním období. Dusičnany představují významný zdroj živin pro vegetaci, která je spotřebovává pro svůj růst. Díky tomu má obsah dusičnanů v povrchových vodách výrazný roční cyklus. Minimum dosahují na jaře a v létě, kdy jsou spotřebovávány vegetací, maximum pak v zimě a na podzim v mimovegetačním období.

Mezi nejvýznamnější antropogenní zdroje dusičnanů patří zemědělství. Dochází zde ke splachům dusíkatých hnojiv z polí. Pro znečištění povrchových i podzemních vod nejhůře působí průmyslová hnojiva na bázi dusičnanů, která jsou snadno rozpustná ve vodě a snadno infiltrují do podzemních vod (Langhammer, 2002). Srážkové události mají na koncentrace dusičnanů v povrchových vodách výrazný vliv, jelikož zde dochází k ředění.

Zemědělské úpravy - drenáže a meliorace - situaci zhoršují, neboť se jimi dusičnany dostávají přímo do povrchových vod, kde způsobují spolu s fosforečnany eutrofizaci.

Mezi další zdroje dusičnanů patří atmosférická depozice. Oxidy dusíku (NO_x) se do prostředí dostávají spalováním fosilních paliv v dopravě a energetice.



Obr. č. 3: Cyklus dusíku

Zdroj: SWAT Documentation

V povodí Rakovnického potoka patří k nejvýznamnějším zdrojům dusičnanů:

- Splaškové a odpadní vody: nedostatečné ČOV, které byly v době pozorování pouze na 3 místech, nyní je v povodí Rakovnického potoka již 17 ČOV
- Průmyslové odpadní vody: průmysl soustředěn do oblasti Rakovník – Lubná, Nové Strašecí – Rynholec a Křivoklát - Roztoky. Mezi hlavní zdroje znečištění patří Rakovnické keramické závody (RAKO), Pivovar Krušovice, strojírenské podniky VALEO a ATESO a chemický závod Procter&Gamble Rakona, který vyrábí detergenty.
- Zemědělské odpadní vody: zemědělství zabírá cca 55 % území, což je přibližně 200km² půdy. Převládá zde chov skotu a prasat, který se podílí na znečišťování toků organickými látkami a živinami. V severní části okresu je chmelová oblast, která zásobuje pivovar Krušovice.
- Srážková voda: kvůli kyselým srážkám se mění pH a může dojít k narušení hydrogenuhličitanové rovnováhy

3. Metodika

Pro modelování odtoku a koncentrace dusičnanových aniontů v povodí Rakovnického potoka byl zvolen semi-distribuovaný model SWAT, který pracuje s denním časovým krokem a je určen pro středně velká až velká povodí (Abbaspour et al., 1997). Jedná se o fyzikálně založený model, který modeluje zájmové povodí na základě jeho rozdělení do velkého počtu malých plošek.

Hlavními komponenty modelu jsou:

- Topografie
- Hydrologie
- Meteorologie
- Pedologie
- Land use

3.1 Příprava vstupních dat

Základ všech procesů v programu SWAT tvoří digitální model terénu, půdní mapa, mapa land use a land cover, databáze půdních parametrů a meteorologická data. Množství dat závisí na účelu simulace a zvolené metodě výpočtu.

Všechna vstupní data musela být do modelu vložena ve speciálním formátu, který je podporován SWAT. K přípravě dat byl použit program ArcSWAT, mezi další volně dostupné programy patří MapWindow.

Příprava dat, spuštění modelu SWAT a zobrazení výsledků probíhá následovně:

- 1) Vymezení říční sítě a dílčích povodí
- 2) Vymezení hydrologických jednotek (HRU)

- 3) Vytvoření databáze půd
- 4) Definice hydrologických dat (teplota, srážky, radiace, vlhkost)
- 5) Úprava vstupních souborů s modelovými parametry
- 6) Volba metod výpočtu
- 7) Spuštění modelu SWAT
- 8) Grafické a mapové zobrazení výsledků
- 9) Citlivostní analýza a kalibrace

Tabulka č. 1: Popis vstupních dat do modelu SWAT

Data	Formát dat	Zdroj dat
DMT	grid	ČÚZK - DMÚ 25
Mapa říční sítě	vektor	DIBAVOD
Mapa půd	vektor nebo grid	VÚMOP
Mapa land use	vektor nebo grid	CORINE
Poloha meteorologických stanic	tabulka souřadnic (".dbf")	ČHMÚ
Denní úhrny srážek	tabulka denních hodnot	ČHMÚ
Max. a min denní teploty vzduchu	tabulka denních hodnot	ČHMÚ
Relativní vlhkost vzduchu	tabulka denních hodnot	ČHMÚ

3.2 Popis zájmového povodí

Rakovnický potok (dříve Rokytka) pramení jihovýchodně od obce Drahouš v nadmořské výšce 578 m. n. m. a odvodňuje oblast o rozloze 368 km². Rakovnický potok je levostranným přítokem Berounky, do které ústí v Roztokách u Křivokláta na jejím 63. říčním km v nadmořské výšce 235 m. n. m.. Povodí Rakovnického potoka náleží k úmoří Severního

moře, do něhož je voda odváděna Berouňkou, Vltavou a Labem. Významný vliv na hydrografii a odtokové poměry mají rybníky, které se nacházejí v horní části toku. Nejvýznamnějším systémem je Jesenická rybníční soustava, která byla založena v 16. a 17. století Vilémem Svitákem z Landštejna a tvoří ji Krtský rybník, Kofiler, Velký rybník, Jesenický rybník, Horní Fikač a Dolní Fikač. Většina z nich slouží k rybochovným účelům, některé plní i funkci rekreační. Říční síť Rakovnického potoka lze charakterizovat jako lehce asymetrickou síť stromovitého typu.

Na základě ekohydromorfologického výzkumu provedeného Matouškovou (2007) lze povodí hodnotit jako středně antropogenně ovlivněné. Je to především kvůli relativně vysokému podílu mírně antropogenně ovlivněných a přírodních úseků v chráněných územích. Alarmující stav byl shledán v pramenné oblasti Rakovnického potoka, kde by bylo vhodné provést revitalizační opatření – výsadba břehové vegetace, umožnit přirozené formování koryta. Velká část hydrologické sítě (45 %) podlehla antropogenním úpravám, jen pouhých 8 % z celkové délky Rakovnického potoka bylo klasifikováno jako přírodní, či přírodě blízké. Jedná se o oblast horního toku mezi Krtskou a Jesenickou rybníční soustavou a část toku protékající CHKO Křivoklátsko. Jako mírně antropogenně ovlivněné bylo hodnoceno 42 % z celkové délky toku.

3.2.1 Geologická stavba povodí Rakovnického potoka

Pestré geologické podloží oblasti se odráží na kvalitě vody ve vodních tocích. Dominující je zde kvartérní pokryv, který tvoří 95 % rozlohy území. Celé povodí lze na základě geologické stavby rozdělit na 2 velké části – jihovýchodní proterozoickou a severozápadní permokarbonskou (Balatka, 1973). Geologická odlišnost permokarbonské a proterozoické oblasti podmiňuje odlišně pedologické, hydrologické, hydrogeografické a geomorfologické poměry. Jádrem celého území zaujímá Rakovnická kotlina, která je tvořena převážně na permokarbonských pískovcích, jílovcích a slepencích. Permokarbon je na Rakovnicku charakterizován značnou rozmanitostí sedimentů, hrubozrnné uloženiny – slepence a pískovce se střídají s jílovcem, které vznikaly v periodách tektonického klidu, kdy byly i vhodné podmínky pro vznik uhelných slojí. Různá zrnitost karbonu i permu (střídání slepenců, arkóz,

pískovců a jílovců) způsobuje, že zvodnělé horizonty mají nepravidelné rozšíření a jejich vydatnost značně kolísá. Pod polohami nepropustných jílovců vznikají lokálně artézské vody např. v okolí Rakovníka. Vydatnost podzemních zdrojů pitné vody je ovlivňována také důlní činností. Důlní vody naopak doplňují stavy povrchových toků v období nízkých srážek. Puklinové nebo vrstevní prameny v permokarbonu mají kolísavou a poměrně malou vydatnost. I jejich četnost je poměrně nízká a prostorově jsou značně rozptýlené. Kvartérní sedimenty, které jsou lokálně rozšířené, lze zařadit k fluviálním, eolickým, deluviálním a antropogenním uloženinám. Z říčních sedimentů jsou zastoupeny především nivní sedimenty (aluvia), které vyplňují těsné okolí toků. Jejich rozšíření je velmi proměnlivé, protože údolí malých toků jsou převážně úzká a pouze v místech zmírnění spádu toku dochází k jejich rozšíření a k zvětšení aluviálních náplavů. Na několika místech jsou zachovány zbytky terasových uloženin (štěrkopísků) např. podél Lišanského potoka. Tato terasa je časově řazena k střednímu pleistocénu. V geologické činnosti vodních toků převažuje spíše eroze nad sedimentací.

Jádro území zaujímá Rakovnická kotlina, která tvoří tektonickou a strukturní sníženinu na permokarbonských prachovcích, pískovcích a slepencích. Říční síť zde byla formována na konci terciéru pod vlivem tektonických pohybů, hlavně neotektonickým výzdvihem Krušných hor. Současná říční síť je značně ovlivněna člověkem. Tyto úpravy souvisí s výstavbou mlýnů a mlýnských náhonů, budováním rybníků a protipovodňových opatření. K plošně nejrozsáhlejší úpravám došlo v souvislosti s hydromelioračními opatřeními v 2. polovině 20. století. Pro povodí Rakovnického potoka je typická rozkolísanost odtoku. Dlouhodobý průměrný roční průtok je $0,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ČHMÚ, 2012).

Tabulka č. 2: Základní fyzicko-geografická charakteristika povodí Rakovnického potoka

Plocha (km ²)	368,14
Délka hlavního toku (km)	47,4
Nejvyšší a nejnižší nadm. výška (m n. m.)	603,4; 235
Průměrný sklon hlavního toku (‰)	7
Průměrný průtok (m ³ .s ⁻¹) 1970–2001	0,63
Limnigraf (ř. km)	Rakovník (17,5)
Průměrná roční srážka (mm) 1961–1999	514
Geologie	permokarbonské slepence, prachovce, pískovce, jílovce proterozoické břidlice
Hlavní půdní typy	kambizemě, hnědozemě, ilimerizované půdy

3.2.2 Fauna a flora Křivoklátska

CHKO Křivoklátsko byla vyhlášena v roce 1978 a ještě o rok dříve byla oblast zařazena mezi biosférické rezervace organizace UNESCO. Unikátem CHKO Křivoklátsko je souvislý komplex přírodních či minimálně pozměněných lesů. Díky dalším přírodním činitelům jako jsou teplé suché podnebí, geologický podklad, říční i vrcholový fenomén si krajina zachovala charakteristické prvky pahorkatin. Svou roli hraje i historicky řídké osídlení. Díky jedinečné přírodě je snaha jádrovou oblast Křivoklátska zařadit mezi národní parky.

Z nelesní vegetace jsou pro Křivoklátsko typická stepní společenstva nazývaná pleše. Na těchto suchých stanovištích se daří zjara kvetoucímu koniklecí jarnímu (*Pulsatilla vernalis*), tařici skalní (*Aurinia saxatilis*), bělozářce liliovité (*Anthericum liliago*), kamejce modronachové (*Buglossoides purpureocaerulea*). V nivách toků jsou typické květnaté psárkové louky, na šterkopiscích se nacházejí ovsíkové louky. V nivě Berounky můžeme najít druhově bohaté košťavové louky s mochnou bílou (*Potentilla alba*) a vstavačem kukačkou (*Orchis morio*). Pobřežní společenstva tvoří chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*), zevar vzpřímený (*Sparganium erectum*) a puškvorec obecný (*Acorus calamus*) (Kolbek, Brabec, 1998).

Fauna Křivoklátska je typickou faunou teplé lesní oblasti se zachovalými lesními společenstvy. Rozmanitost fauny odpovídá pestrosti vegetačního pokryvu a geomorfologické

členitosti území. Vysoká druhová rozmanitost zařadila toto území i mezi významné Ptačí oblasti Evropy.

Díky Ložkovi (1975) je zde velmi dobře prozkoumána fauna měkkýšů. Nejbohatší společenstva lze nalézt v ostrých údolních zářezech, kde je vyskytuje např. jehlovka hladká (*Platyla polita*), žebernatka drobná (*Ruthenica filograna*) či vřetenatka lesklá (*Bulgarica nitidosa*), která je neoendemickým druhem povodí Berounky. Měkkýši nám také umožňují sledovat vývoj oblasti v posledním geologickém období, zvláště v oblastech usazování holocenních pěnoveců, kde se schránky měkkýšů dobře zachovaly v jednotlivých vrstvách a můžeme podle jednotlivých druhů rekonstruovat stav přírody právě v době vzniku vrstvy.

Pavoukovci jsou reprezentováni stepníkem rudým (*Eresus cinnaberinus*) a sekáčem (*Nemasoma trieste*), který je postglaciálním reliktem.

Významným prvkem křivoklátské vodní fauny je rak kamenáč (*Astacus torrentium*), kriticky ohrožený druh obývající některé menší vodní toky v prosperujících populacích. Rak říční (*Astacus astacus*) je dosti častý ve zdejších tocích i některých rybnících.

Křivoklátsko slouží jako oblast hnízdění pro 120 druhů ptáků, a proto bylo zařazeno mezi významné ptačí oblasti. Mezi nejvýznamnější ptáky této oblasti patří: čáp černý (*Ciconia nigra*), výr velký (*Bubo bubo*), kulíšek nejmenší (*Glaucidium passerinum*), sýc rousný (*Aegolius funereus*), ledňáček říční (*Alcedo atthis*), datel černý (*Dryocopus martius*), žluna šedá (*Picus canus*), strakapoud prostřední (*Dendrocopos medius*), luňák červený (*Milvus milvus*), moták pochop (*Circus aeruginosus*), včelojed lesní (*Pernis apivorus*), chřástal polní (*Crex crex*), skřivan lesní (*Lullula arborea*), pěnice vlašská (*Sylvia nisoria*), lejsek malý (*Ficedula parva*) a ůuhýk obecný (*Lanius collurio*). Po několikaleté péči se zvedají stavy koroptve polní (*Perdix perdix*).

Vzhledem k historickému vývoji je Křivoklátsko tradičně oblastí lovné zvěře, především vysoké. V současné době jsou v území vysoké stavy jelenů (*Cervus elaphus*) a prasat (*Sus scrofa*). Méně početná je zvěř srnčí (*Capreolus capreolus*). Vysazen byl muflon (*Ovis musimon*), daněk (*Cervus dama*) a jelen sika (*Cervus nipon*). Zvláště vysoké početní stavy muflona však působí citelné škody na nejvzácnějších teplomilných a suchomilných rostlinných společenstvech (Kolbek, 1996).

3.2.3 Socioekonomická charakteristika oblasti

V celém povodí Rakovnického potoka je velmi stará struktura osídlení. Původní sídelní síť pochází již ze 16. století. Pro jižní část povodí je charakteristická hustá síť menších obcí, v severní oblasti dominují větší sídla více od sebe vzdálená.

Podle sčítání lidí, domů a bytů provedeného v roce 2001 žilo na území povodí 32 876 obyvatel. V oblasti se nachází 15 obcí s počtem obyvatel větším než 500, největším městem je pak krajské město Rakovník se 17 425 obyvateli (ČSÚ, 2003). Křivoklátsko a Jesenicko patří mezi populární rekreační oblasti, nachází se zde celkem 935 rekreačních objektů. Kanalizační síť byla ve sledovaném období 1999 – 2000 vybudována jen ve městech Rakovník, Jesenice a Krušovice. V ostatních obcích byly splaškové vody shromažďovány v domovních jímkách a poté vyváženy na polní pozemky.

Jako zdroj znečištění z lidských sídel lze kromě splaškových vod považovat i komunální odpadní vody, které tvoří směs splašků z domácností a menších provozoven, srážkový odtok z ulic, parkovišť a střech. Tyto vody jsou bohaté na velké množství nečistot a organických zdraví škodlivých látek. Udává se, že každý člověk vyprodukuje denně až 295 l komunálních odpadních vod (Groda et al., 2007).

Dle studie prováděné VÚV TGM Praha jsou průměrné hodnoty specifických množství znečištění 16 g/obyvatele/den BSK₅, 1,55 g/obyvatele/den celkového fosforu a 24 g/obyvatele/den celkového dusíku (Just, 1996).

Zemědělství tvoří významný zdroj znečištění převážně plošného charakteru přinášející do povrchových i podpovrchových vod sloučeniny dusíku a další látky. Distribuce látek pocházejících ze zemědělství záleží na mnoha faktorech jako je klima, aplikace hnojiv, půdní typ a půdní druh, matečná hornina, obsah skeletu, hloubka půdy, svažitost a druh porostu. Louky a pastviny jsou z tohoto hlediska vhodnější, jelikož díky své struktuře a celistvosti lépe zadržují vodní srážky než zemědělsky obdělávaná půda. Hlavním zdrojem fekálního znečištění vod jsou statková hnojiva, která mohou být zároveň zdrojem infekcí. Z komerčních hnojiv jsou nejčastěji používána NKP, kterými do půdy přidáváme dusík, draslík a fosfor. Sloučeniny dusíku a fosforu způsobují v povrchových vodách eutrofizaci, čili nadměrný rozvoj sinic, řas a vyšších rostlin. Na orné půdě je možné od začátku července do začátku listopadu používat minerální organická hnojiva v dávce do 40 kg N/ha nebo hnojiva s rychle

uvolnitelným dusíkem, např. kejda, močůvka. Hnojení až do 80 kg N/ha je možné ve specifických případech, kterými jsou meziploidy a ozimé plodiny následující po obilnině (Groda et al., 2007). Zemědělské statky se vyskytují v Chrášťanech, Kněževsi, Kounově, Lišanech, Mutějovicích, Pavlíkově, Senomatech, Svojetíně, Jesenici, Křivoklátu a v Rakovníku.

Zalesněná půda, která tvoří asi 39 % rozlohy území povodí Rakovnického potoka, není v porovnání s půdou zemědělskou velkým zdrojem znečištění. Výjimkou je lesní těžba, při které dochází k vyplavování herbicidních a pesticidních přípravků do povrchových vod.

Průmyslové závody řadíme mezi významné bodové zdroje znečištění. Průmyslové odpadní vody musí být před vypuštěním do veřejné kanalizace upraveny tak, aby vyhovovaly provoznímu řádu kanalizace, resp. ČOV. Průmyslové odpadní vody by měly být čištěny na samostatných ČOV kvůli obsahu toxických látek (těžké kovy, pesticidy, atd.). V povodí Rakovnického potoka je zastoupen průmysl chemický, potravinářský, stavební a strojírenský. Odpadní vody z každého závodu jsou druhově a charakterově specifické a zpravidla se hodnotí pomocí BSK₅ (biochemickou spotřebou kyslíku za 5 dní při 20°C) či pomocí populačního ekvivalentu znečištění (PEZ). Vyjádření pomocí PEZ je však jen orientační, jelikož každá změna technologie výroby, spotřeby vody a separace mohou vést k významné změně složení průmyslových odpadních vod. Například Královský pivovar v Krušovicích má PEZ přibližně 150 – 350 na 1 m³ piva, prádelna 350 – 900 na 1 t prádla, mlékárna 40 – 230 na 1 m³ mléka a papírny 200 – 900 na 1 t papíru (Groda et al., 2007).

3.2.4 Popis odběrových profilů

Na povodí Rakovnického potoka bylo zvoleno 8 odběrových profilů. K odebrání vzorků a stanovení zde docházelo v letech 1998 až 2000 v rámci projektu Ekologické hodnocení kvality vody v malých povodích – Rakovnický potok (Benešová et al., 2001). Tyto vzorky budou sloužit k porovnání modelovaných a naměřených hodnot a následné kalibraci.

1) Profil Krty

Odběrové místo bylo umístěno nad osadou Krty, asi 600 m pod hrází Krtského rybníka. Koryto je zde úzké s bloky a balvany granitu. Vodnost toku byla po celou dobu sledování malá. Zvýšené hodnoty znečištění povrchových vod dusičnany je zde pravděpodobně způsobeny zemědělstvím, rezidenty i činností chatařů.

2) Profil Pšovky

Odběrové místo se nachází na 30. km toku, cca 1,5 km za obcí Pšovky. Tento profil by měl reprezentovat zemědělsky užívanou krajinu, břeh je zde částečně regulovaný.

3) Kolečovický potok

Levostranný přítok Rakovnického potoka, Kolečovický potok, tvoří významný zdroj znečištění. Přináší vody znečištěné organickými látkami a živinami v podobě amoniakálního a dusičnanového dusíku a celkového fosforu (Benešová et al., 2001).

4) Profil Rakovník

Rakovnický potok v Rakovníku je charakterizován uměle napřímeným a vydlážděným korytem. Voda byla odebírána na konci městské zástavby, před odtokem z ČOV a před přítokem Lišanského potoka. Toto odběrové místo bylo zvoleno z důvodu dokumentace vlivu městských odpadních vod a průmyslového znečištění.

5) Lišanský potok

Koryto Lišanského potoka je částečně regulováno a tento přítok přináší do Rakovnického potoka znečištění způsobené průmyslovými zdroji. K výraznému zlepšení došlo po vybudování ČOV u pivovaru Krušovice.

6) Profil Pustověty

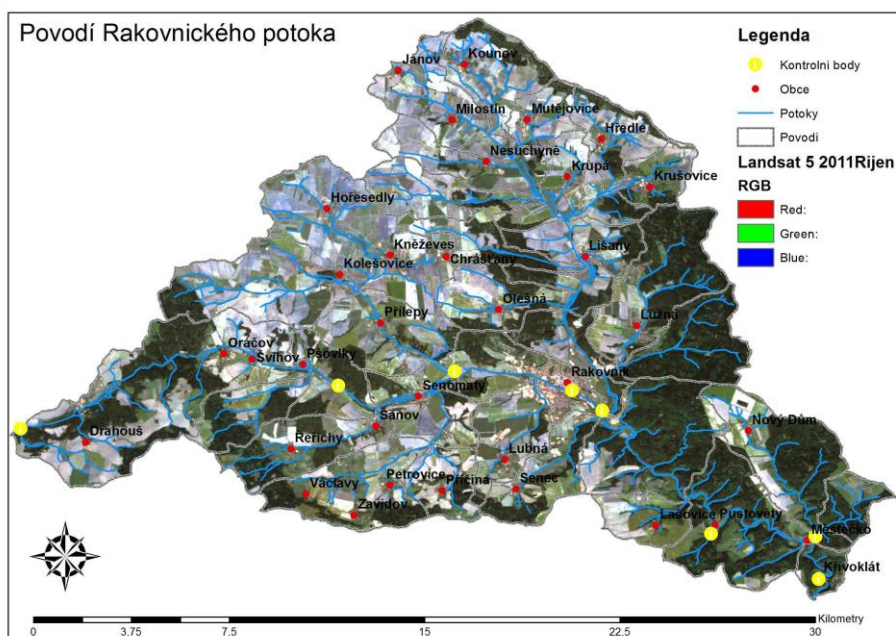
Odběrové místo leží v obci, cca 20 m od mostu proti proudu Rakovnického potoka. Negativně zde ovlivňují kvalitu vody odtok z ČOV a přítok Lišanského potoka.

7) Profil Městečko

Vzorky byly odebírány v obci před soutokem s potokem Ryšava. Tento tok pramení v CHKO Křivoklátsko, netvoří tedy zdroj znečištění, naopak kvalitu vody zlepšuje.

8) Profil Křivoklát

Toto odběrové místo se nachází v CHKO Křivoklátsko, avšak kvalita zde vody není moc dobrá. Jsou zde několikanásobně překračovány hodnoty amoniakálního dusíku a fosforu.



Obr. č. 4: Povodí Rakovnického potoka se znázorněním odběrových profilů (kontrolní body)

3.3 Topografie

Prvním krokem programu SWAT je vymezení subpovodí v rámci povodí Rakovnického potoka. Základem všech operací modelu SWAT je digitální model terénu, na jehož přesnosti

závisí výsledná míra shody simulovaných veličin s reálnými měřeními hodnotami (DiLuzio et al., 2005).

V případě Rakovnického potoka byl digitální model terénu vytvořen dle výškopisu poskytnutého Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním v programu ArcMap. Model SWAT podporuje DMT ve formě TIN i ve formě rastru. Na základě DMT byla v prostředí SWAT vytvořena vrstva subpovodí včetně výpočtu základních parametrů. Model SWAT umožňuje automaticky zakreslit síť vodních toků, ale v mém případě byla zvolena podkladová mapa z DIBAVODU. Takto bylo zvoleno z důvodu, že automaticky zakreslená vodní síť se poněkud odlišovala od té skutečné a mohlo by dojít ke zkreslení výpočtu. DIBAVOD, čili digitální báze vodohospodářských dat, je referenční geografická databáze, která slouží k tvorbě tematických kartografických výstupů s vodohospodářskou tematikou ochrany vod a prostorové analýzy. Počet a velikost plochy subpovodí je ovlivněna přesností DMT a uživatel si ji nastavuje pomocí parametru „threshold area“. Doporučená minimální rozloha subpovodí je 5 % z celkové plochy řešené jednotky (Arnold, Fohrer, 2005). DMT byl vytvořen v programu ArcToolbox pomocí Spatial Analyst Tools převedením do rastrového formátu.

Dále jsou zde popsány jednotlivé kroky v modelu SWAT.

a) Vymezení povodí:

Tento nástroj umožňuje uživateli automaticky definovat subpovodí díky využití DMT. Po specifikování parametrů dojde k vytvoření subpovodí o určitém počtu a velikosti. Nástroj pro vymezení povodí používá a rozšiřuje ArcGIS a Spatial Analyst. Pro tento krok je nutné mít DMT v ESRI ve formátu grid. Když je rozdělení povodí hotové, dojde k vytvoření topografického reportu, který je přidán k existujícímu projektu a vrstvě a obsahuje: povodí, rozvodnice, závěrový profil a monitorovací body. Důležité v tomto kroku je nastavení souřadnic, kdy je nutné jako Z-unit zvolit metry.

Zvolení masky je možné provést třemi způsoby:

- i. Načtením mapové vrstvy z disku
- ii. Vybráním z mapy
- iii. Manuálně

b) Návrhová specifikace říční sítě:

Tento volitelný krok se používá v případě, kdy DMT není natolik přesný, aby dle něj mohla být definována říční síť. V mém případě byla v tomto kroku načtena vrstva říční sítě z DIBAVODu.

c) Příprava digitálního modelu terénu:

Digitální model terénu je reprezentace reliéfu zemského povrchu v paměti počítače, složená z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje odvozovat výšky mezilehlých bodů (Šíma, 2003).

Když je načten DMT a jsou nastaveny všechny potřebné soubory dat, vybereme v programu DEM preprocessing volbu Směr proudění a akumulace (Flow direction and Accumulation). Zvolením této funkce je vytvořena mapová mřížka, v níž jsou odstraněny všechny bezodtoké oblasti.

d) Specifikace říční sítě:

Počáteční říční síť a výstupy jsou již definovány. Dále je třeba definovat prahovou hodnotu, aby byla určena minimální velikost subpovodí. Zahraniční autoři radí zvolit tuto hodnotu cca mezi 5 - 10 % celkové plochy povodí. V mém případě byla tato hodnota nastavena na 200 ha, čímž došlo k vytvoření 106 buněk.

e) Přednastavené povodí a potoky

V tomto kroku se vytváří mapová vrstva monitorovacích bodů, kterých bylo v mém případě 8, a jsou popsány v kapitole 3.3.4 Popis odběrových profilů. Tato vrstva obsahuje výstupy subpovodí. Dále zde uživatel může vložit bodové zdroje znečištění, kterými jsou hlavně městské a průmyslové zdroje.

f) Definice vstupních a výstupních údajů

Zdroje a výstupy mohou být zvoleny buď ručně, nebo manuálně. Jako výstup byl zvolen závěrový profil, kdy se Rakovnický potok vlévá do Berounky. K definování vstupů byla vybrána mapová vrstva měst, u nichž byly odhadnuty vstupy organického N, organického P, dusičnanů a minerálního P navržené podle počtu obyvatel dle odhadu provedeného Justem (1996), o kterém byla již zmínka v kapitole 3.3.3 Socioekonomická charakteristika oblasti. Po tomto kroku je třeba zvolit příkaz Výpočet parametrů subpovodí. Tato funkce počítá hydromorfologické parametry pro každé subpovodí a relativní tok látek.

g) Vodní nádrže

Nyní je možno vložit či vymazat vodní nádrže v povodí. Tento krok je prováděn manuálně na základě mapového podkladu z DIBAVODu, který obsahuje vodní nádrže a rybníky. Modelování ve SWAT počítá jen s vodními nádržemi většími než 20 000 m². V případě Rakovnického potoka to bylo 13 rybníků.

3.4 Hydrologie

Základem vytvoření hydrologické sítě jsou HRU – Hydrologic Response Unit. Tyto jednotky jsou kombinací jednotlivých typů půdního pokryvu, land use a sklonu. HRU jsou vymezovány automaticky, ale uživatel si může stanovit parametry tak, aby byla zanedbána území s malou plochou a tato byla přeřazena k dominantním typům. Tyto jednotky jsou vyřazeny na základě uživatele o nejmenším procentuálním nebo plošném zastoupení land use, půdy a sklonitosti. Pro povodí Rakovnického potoka byl tento parametr nastaven na hodnotu 5 %. Při této hodnotě lze předpokládat zastoupení všech důležitých kombinací land use a půdních typů ve všech sklonitostech. Celkem bylo v povodí Rakovnického potoka vymezeno na 106 HRU s průměrnou plochou 350 ha.

3.4.1 Land use

Land use je jedním z hlavních parametrů charakterizujícím chování hydrologické oblasti. Standardní charakteristiky krajinného pokryvu jsou pro americké uživatele součástí programu SWAT. Pro účely této diplomové práce bylo tudíž nutno zvolit náhradní zdroj pro získání těchto dat, proto byl mapový podklad vytvořen na základě podkladové mapy CORINE (Coordination of Information in the Environment). Program má 3 části: Land cover (krajinný pokryv), Biotopes (biotopy) a Air (ovzduší). Databáze byla vytvořena polygony vzniklými interpretací družicových snímků vegetačního pokryvu.

Obecně lze vyhodnotit, že zemědělská půda zabírá přibližně 55 % území povodí Rakovnického potoka, z čehož orná půda tvoří asi 84 %, louky a pastviny 7 %, chmelnice 5,4 % (Matoušková, 2007). V jižní části povodí převládají mělké písčité půdy, na kterých se pěstují především brambory a obilniny. Ve střední a severní části území se vyskytují hluboké jílovité „červenice“ a bohatým humusovým horizontem, které vytvářejí ideální podmínky pro pěstování chmele.



Graf č. 1: Rozdělení zemědělské půdy v povodí Rakovnického potoka

Dílními postupy vytvoření vrstvy land use v modelu SWAT jsou:

- definování land use
- reklasifikace land use vrstvy
- definování půd

- reklasifikace vstvy půd
- reklasifikace svažitosti
- překryv land use/soil/slope

3.4.2 Půdy a reliéf

Dominantním půdním typem v povodí Rakovnického potoka jsou kambizemě modální, dále se zde vyskytují hnědozemě a ilimerizované půdy.

Vytvoření mapové vrstvy pro charakterizování půd bylo velice obtížné. Program SWAT umožňuje automatický výběr z vrstev pro americké uživatele, což v mém případě nebylo možné. Vrstva musela být tudíž vytvořena na základě papírových map, další data mi poskytl Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd. Jednalo se o 3 sondy z povodí Rakovnického potoka, které podrobně popisují daný půdní profil (mocnost jednotlivých profilů, obsah humusu, písku, prachu, jílu, atd.).

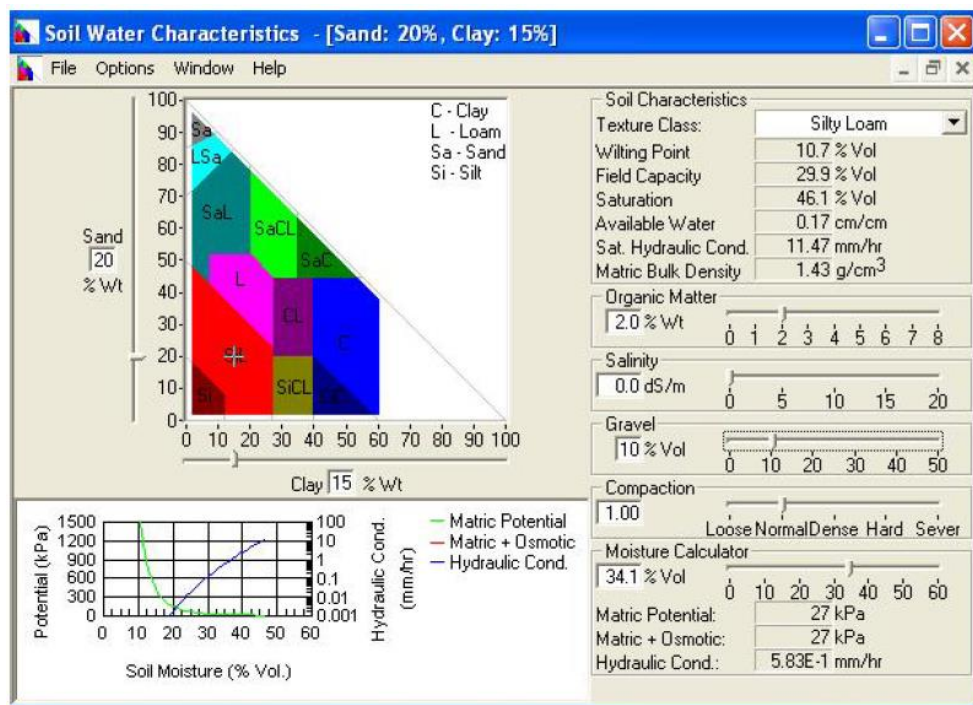
Tabulka č. 3: Specifikace půdních sond

SONDA	OKRES	OZN S-son	PORADI	OZN horiz	HORIZON	LOUBKA1	LOUBKA2	od-do	<0,002	0,002-0,05	0,05-2	USDA	C _{ox}	OHR	MKVK
196	Rakovník	S4(196)	1	Ap	ornice	0	22	0-22	13,8	21,6	64,6	sandy loam	2,2	1,40	26,00
196	Rakovník	S4(196)	2	Bv	kambický	22	60	22-60	11,0	8,9	80,1	sandy loam	0,1	1,56	22,00
196	Rakovník	S4(196)	3	BC		60	90	60-90	13,8	9,7	76,5	sandy loam	0,0		
196	Rakovník	S4(196)	4	C		90	150	90-150	11,9	7,6	80,5	sandy loam	0,0		
196	Rakovník	S4(196)	5												
198	Rakovník	S6(198)	1	Ap	ornice	0	32	0-32	26,6	49,0	24,4	loam	1,1	1,71	30,00
198	Rakovník	S6(198)	2	AB		32	48	32-48	35,8	48,5	15,7	silty clay loam	1,0	1,49	31,00
198	Rakovník	S6(198)	3	Bt	luvicový	48	65	48-65	38,9	50,3	10,8	silty clay loam	0,5	1,37	38,00
198	Rakovník	S6(198)	4	Cca		65	100	65-100	26,1	53,4	20,5	silt loam	0,2	1,45	36,00
198	Rakovník	S6(198)	5	Dca		100	130	100-130	20,9	12,4	66,7	sandy clay loam	0,1	1,80	25,00
202	Rakovník	S10(202)	1	Ap	ornice	0	30	0-30	18,6	25,6	55,8	sandy loam	1,1		
202	Rakovník	S10(202)	2	IC		30	60	30-60	8,6	3,4	88,0	loamy sand	0,1		
202	Rakovník	S10(202)	3	IIIC		60	85	60-85	16,4	1,1	82,5	sandy loam	0,0		
202	Rakovník	S10(202)	4	IIIC		85	120	85-120	8,9	4,1	87,0	loamy sand	0,0		
202	Rakovník	S10(202)	5												

Díky programu *Soil Water Characteristics* mohla být tato data přepočítána k následnému využití v modelu SWAT. V tomto softwaru jsou využívány regresní rovnice, které byly odvozené na základě více než 2000 půdních profilů měřených v USA a v Evropě. Vstupem do programu je procento jílu (částice do 0,002 mm) a písku (0,05 – 2 mm). Výstup tvoří hodnoty objemové hmotnosti a pórovitosti, bodu vadnutí, polní kapacity, využitelné vodní kapacity a

nasycené hydraulické vodivosti. Dále lze zadat obsah humusu a obsah skeletu. Obr. č. 5 ukazuje graf pro hlinité půdy.

Při specifikaci jsem počítala s malým obsahem skeletu (10%) a středním obsahem humusu.



Obr. č. 5: Program SPAW – výpočet fyzikálních vlastností půdy

3.4.3 Definice HRU

Při vymezení HRU jsou pro každé subpovodí nejdříve vypočteny plochy všech kombinací typů půd a vegetace. Dále je provedena generalizace, čili vyloučení ploch s charakteristickým výskytem půd a vegetace, které se vyskytují jen na velmi malém území. Míra generalizace je určována 2 parametry:

- *Land use threshold (%)* – určuje minimální plochu kategorie pro využívání území v každém subpovodí
- *Soil threshold (%)* – určuje minimální plochu kategorie půd pro dané subpovodí

V tomto kroku se nastavuje velikost a kombinace land use/soil/slope podle kterých jsou vytvořeny jednotlivé HRU. Pro každé subpovodí může být vytvořena 1 i více kombinací

unikátních land use/soil/slope. Podrozdělení povodí na plochy s unikátní kombinací land use a půd umožňuje modelu odrážet rozdíly v evapotranspiraci a ostatních hydrologických parametrech pro různé půdní pokryvy a plodiny. Odtok je předpovídán zvlášť pro každou HRU. Toto rozdělení umožňuje přesnější popis vodní bilance.

Pro každé subpovodí lze zvolit jednu nebo více jednotek HRU. Pro více jednotek je nutno definovat prahovou hodnotu. Ta byla v mém případě pro land use zvolena na 10 %, pro půdy na 20 % a pro svažitosť na 20 %, což odpovídá manuálem doporučovaným hodnotám. V praxi to znamená, že pokud je daný parametr zastoupen na ploše menší než 10 %, resp. 20 %, je eliminován a jeho plocha rovnoměrně rozdělena mezi dominující typy. Na konci této sekce je opět vytvořen dílčí report.

3.5 Meteorologie

Povodí Rakovnického potoka se řadí mezi středně teplé oblasti v rámci České republiky s nízkými úhrny srážek. Díky malému prostorovému rozsahu je povodí klimaticky homogenní, větší rozdíly se tvoří jen díky nadmořské výšce. Ta ovlivňuje prakticky všechny meteorologické prvky. Dle Guitta (1971) lze většinu území povodí Rakovnického potoka přiřadit k mírně teplé oblasti MT 11. Klimatické charakteristiky odráží níže uvedená tabulka.

Tabulka č. 4: Klimatická charakteristika oblasti

Počet letních dní	40 - 50
Průměrná teplota v lednu (°C)	-2 až -3
Průměrná teplota v červenci (°C)	17 až 18
Průměrná teplota v dubnu (°C)	7 až 8
Průměrná teplota v říjnu (°C)	7 až 8
Srážkový úhrn ve vegetačním období	350 až 400 mm
Počet dní se sněhovou pokrývkou	50 - 60
Počet dní zamračených	120 až 150
Počet dní jasných	40 až 50

Program SWAT je náročný i co se týče meteorologických vstupních dat. V tomto kroku je třeba definovat: denní úhrny srážek, maximální a minimální denní teploty, relativní vlhkost, solární radiaci a rychlost větru. Některá z těchto dat mi poskytl ČHMÚ, ostatní byla k dispozici na stránkách programu SWAT. Tato data musela být zpracována do formátu podporovaného programem. Meteorologická data velkou měrou ovlivňují výsledné koncentrace iontů ve vodách, proto je potřeba je mít co nejpresnější.

Nejvýznamnějším klimatickým faktorem ovlivňujícím koncentrace dusičnanů jsou srážky. Při nízkých a středně velkých průtocích se projevuje kladná korelace mezi průtokem a koncentracemi dusičnanů. Průtok dosahuje maxima v době, kdy do profilu doteče srážková. Při převládajícím hypodermickém odtoku je to způsobeno pravděpodobně vyplavováním dusičnanů z mělkých partií půdního profilu. Periodické změny koncentrací dusičnanů souvisejí s meteorologickým cyklem a bývají krátko až střednědobé. Antropogenní jevy jako odlesnění, přeměnu na ornou půdu apod. se projevují náhlými změnami odtoku. Mezi srážkami a koncentracemi dusíku ve vodách byla prokázána úzká vazba, která je způsobena primárně jejich odnosem z povodí.

Data, která mi poskytl ČHMÚ jsem musela převést do odpovídajícího formátu dBASE table. Část dat byla dohledatelná na webové stránce modelu SWAT, který má tato data jako jediná dostupná i pro neamerické uživatele. Všechny tyto kroky lze nahradit simulací, ostatní autoři to však nedoporučují, jelikož mají meteorologická data značný vliv na výsledek modelování.

a) Tvorba vstupů

Menu tvorby vstupů umožňuje uživateli vytvořit databázi půd (koncovka .sol), meteorologických dat (.wgn) či subpovodí (.sub).

b) Úprava vstupní údajů do modelu SWAT

V menu úpravy vstupů slouží uživateli k upřesnění vstupních parametrů, např. bodových zdrojů či specifikace zemědělského managementu. U bodového zdroje je možno předdefinovat denní zatížení organickým N, organickým P, dusičnany, dusitany, čpavek, minerální P, uhlíkovou biochemickou spotřebu kyslíku, rozpuštěný kyslík, chlorofyl a,

rozpustné pesticidy, sorbované pesticidy, persistentní bakterie a kovy. V tomto kroku je také třeba reflektovat různé typy zemědělského managementu, které byly v mém případě zvoleny takto:

- Chov skotu
- Chov prasat
- Hnojení

Obr.č. 6: Tabulka pro skot

Obr.č. 7: Tabulka pro prasata

Živočišná výroba je zaměřena na produkci jatečního skotu a prasat a je soustředěna v okolí měst Rakovník a Jesenice. Stavy skotu v povodí se od roku 1992 nestále snižují na přibližně 8 000 ks v roce 2000. Chov prasat je ustálen na přibližné hodnotě 23 000 ks. Tyto počty tvoří významný zdroj znečištění, jelikož produkce znečištění pocházející od 1 kusu skotu je rovna znečištění vyprodukovanému 5 až 10 populačními ekvivalentu znečištění (PEZ). U prasat jsou hodnoty o něco nižší, asi 3 - 6 PEZ (Matoušková, 2005). Populační ekvivalent je množství znečištění, které je stejné jako znečištění vyprodukované denně jednou osobou. Celkové zatížení dobyt看 bylo v letech 1999 a 2000 odhadováno přibližně na 129 000 PEZ. Ve srovnání s počtem trvale žijících obyvatel je třeba tento faktor považovat za významný zdroj kontaminace vodních toků zejména organickými látkami.

Odhad produkce sloučenin dusíku je u prasat velice obtížná, jelikož se hodnoty značně liší. Pro skot je odhadovaná produkce celkového dusíku uváděna na 55 kg N za rok za jedno zvíře (Laurent, Ruelland, 2011).

Definice bodových zdrojů byla zvolena dle rozdělení sídel do 6 kategorií dle počtu obyvatel: 100, 200, 500, 1000, 2000 a 20000 obyvatel. Takto bylo zvoleno z praktického důvodu, jelikož by bylo třeba při každé simulaci manuálně zadávat množství znečištění pro každé město a obec. Toto zjednodušení znečištění na konstantní hodnoty s sebou může nést určitou nepřesnost, protože lze předpokládat komplexnější závislost.

Každý obyvatel přispěje dle Justa (1996) cca 24 g celkového N a 1,55 g celkového P do povrchových vod.

Specifikace plošných zdrojů byla upravena pomocí pěstování plodin ve 4 - letém cyklu – obilovina – kukuřice – obilovina - brambory. Takto bylo zvoleno na zemědělských plochách (AGRL). Tato simulace byla zvolena v období let 1979 – 2010.

Před zasetím obilovin jsou aplikována dusíkatá hnojiva. Na podzim je sazba sklizena a jsou aplikována další hnojiva. Na jaře 2. roku je vysázena kukuřice, v září sklizeny. Další plodinou osevního postupu je opět obilovina. Celý cyklus je uzavřen bramborami, před jejichž výsadbou jsou opět aplikována dusíkatá hnojiva. Hnojení bylo upraveno podle 3 scénářů, tabulky jsou uvedeny v kapitole 4.3 Varianta s bodovými zdroji a hospodařením.

Tento krok je obsáhlejší a zahrnuje v sobě podrobnou specifikaci všech dříve nastavených parametrů. Po této úpravě je nutné dát žádost „rewrite“.

3.6 SWAT simulace

Posledním krokem je spuštění simulace SWAT. Menu Simulace umožňuje spuštění modelu, citlivostní analýzu a autokalibraci. V nastavení simulace je nutné uvést časovou periodu, po kterou chceme simulaci provést. Ta je v programu přednastavena dle dat, která jsme v průběhu vkládali. Po vyplnění formuláře se dá spustit SWAT simulaci, kterou je možné poté uložit. Pro meteorologická data a průtoky je nutno zvolit širší interval než je skutečné sledované období z důvodu zpřesnění výsledných dat. V mém případě bylo zvoleno období 1979 – 2010.

Součástí SWAT simulace je i citlivostní analýza. Citlivostní analýza může být prováděna s i bez naměřených dat. Analýza bez neměřených dat poskytne výstup, který popisuje výstupy se

změnami ve specifických parametrech. Analýza provedená s měřenými daty dodatečně poskytne výsledek popisující citlivost chyb modelu.

3.6.1 Kalibrace

Program SWAT obsahuje několik grafických nástrojů pro citlivostní analýzu a kalibraci. Kalibrace probíhá nejprve spuštěním modelu SWAT s výchozími hodnotami parametrů. Program při této simulaci nadhodnocuje objem odtoku i kulminační průtoky. Podíl základního odtoku na celkovém odtoku tvoří asi $\frac{3}{4}$ celkového objemu, ale nesouhlasí časový průběh odtoku. Kalibraci je nedřívě lépe provést manuálně, parametry ovlivňující podzemní odtok a tvar průtokové vlny je třeba upravit dle optimalizačních algoritmů.

Manuální kalibrace slouží k přiblížení měřených a vypočtených hodnot. Slouží ke stanovení opravného faktoru, který je poté přičítán k jednotlivým parametrům. Pro automatickou kalibraci byla vyvinuta řada algoritmů, v modelu SWAT je používán algoritmus SCE-UA (Duan et al., 1992). Model SWAT je při automatické kalibraci opakovaně spouštěn s různými kombinacemi hodnot vstupních parametrů. Pokud dosáhne hodnota statistického ukazatele požadované přesnosti je výpočet ukončen.

3.6.2 Výstupy

Výstupem po ukončení modelování jsou data ve formě atributových tabulek s daty o jednotlivých simulovaných procesech. Tato data jsou seřazena do skupin po dnech a rozdělena dle jednotlivých profilů. Pro analýzu dusičnanů mě zajímá sloupec NO3_output, který vyjadřuje odtok dusičnanů v mg.l^{-1} .

Výsledek lze zhodnotit pomocí koeficientu determinace (R^2), který udává procento, jakým je rozptyl hodnot závisle proměnné veličiny Y vysvětlen změnami hodnot nezávisle proměnné

veličiny X . Koeficient nebývá hodnot od 0 do 1. Čím je hodnota vyšší, tím je výsledný model kvalitnější.

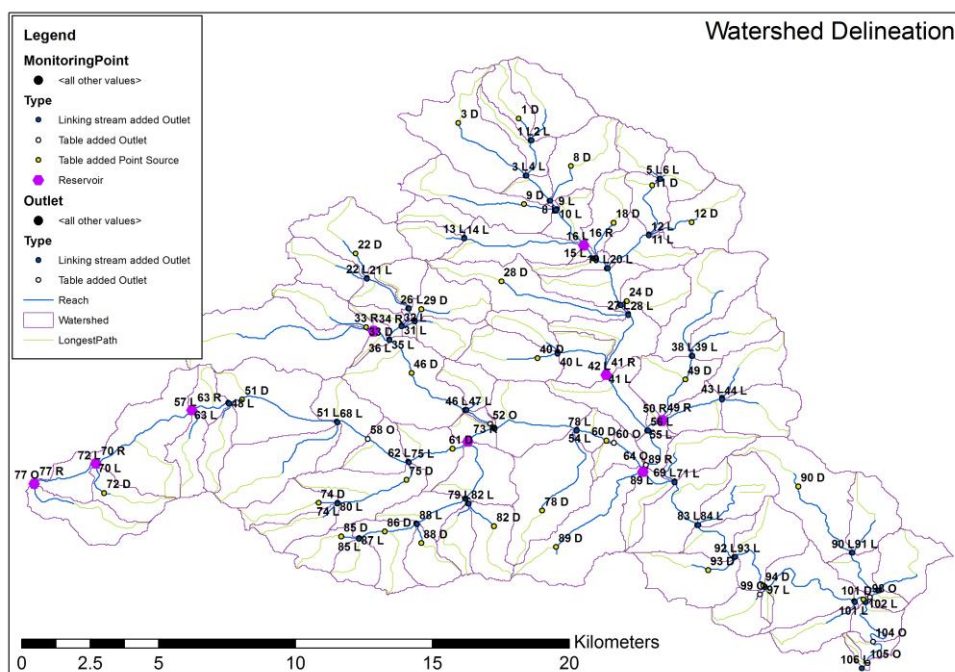
Dalším způsobem jak je možné vyhodnotit shodu výsledků simulace s měřenými hodnotami je využití tzv. Nash – Sutcliffova koeficientu účinnosti předpovědi (Grizzetti et al., 2005). Tento způsob patří k nejvyužívanějším ukazatelům při hodnocení hydrologických modelů a počítá se dle vzorce:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

Kde O_i je pozorované hodnota, P_i modelovaná hodnota, \bar{O} je průměr všech pozorovaných hodnot. Pro $E=1$ vzorek dává plnou shodu měřených a modelovaných hodnot. Záporné E znamená neuspokojivou předpověď. Ukazatel E je citlivý na velikost odchylek naměřených a modelovaných hodnot pro povodňové události s vysokým průtokem a odtokem plavenin (Krause et al., 2005).

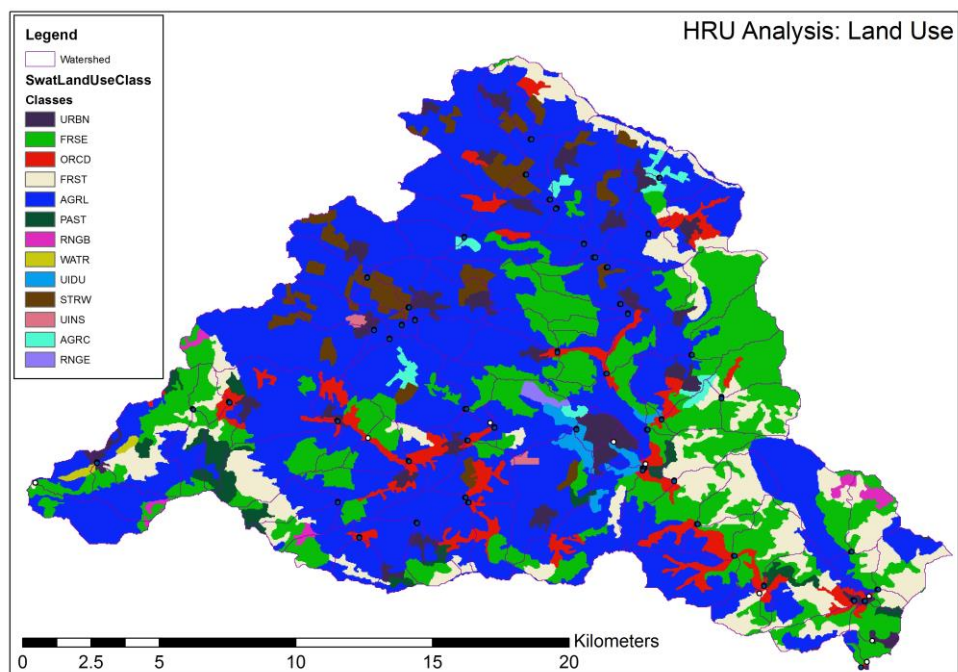
4. Výsledky a diskuze

Po nastudování potřebných podkladů a získání vstupních dat mohlo dojít ke spuštění simulace modelu SWAT. Prvním krokem byla specifikace říční sítě, jejíž výstup ze SWAT je znázorněn níže. Povodí bylo rozděleno na 106 HRU a písmenem O byly označeny odběrové profily, kterých bylo 8 a navíc závěrový profil.



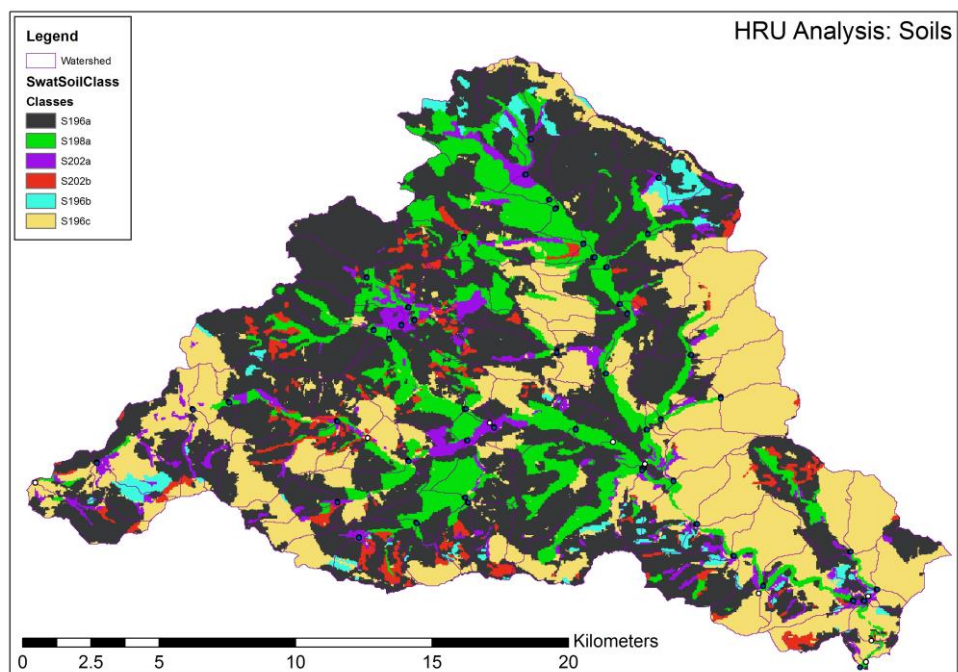
Obr. č. 8: Watershed Delineation

Dalším krokem byla specifikace krajiny pomocí land use. Na základě podkladové mapy z CORINE bylo v povodí Rakovnického potoka identifikováno 13 hlavním typů land use: městská zástavba, jehličnatý les s převahou borovice, ovocné sady určené převážně k pěstování jablek, smíšený les, zemědělská půda s porostem brambor, pastviny s porostem běžných travin, chmelnice, vodní plochy, průmyslová zástavba, pěstování jahod, továrny, zemědělská půda určena k pěstování ozimé pšenice, louky s porostem trav s indexem listové plochy max 2,5.



Obr. č. 9: Hlavní typy land use

Jako třetí v pořadí jsem vytvořila mapu půdního pokryvu, jejímž podkladem byly papírové mapy a 3 půdní sondy.



Obr. č. 10: Mapa půd vytvořená na základě půdních sond z VÚMOP

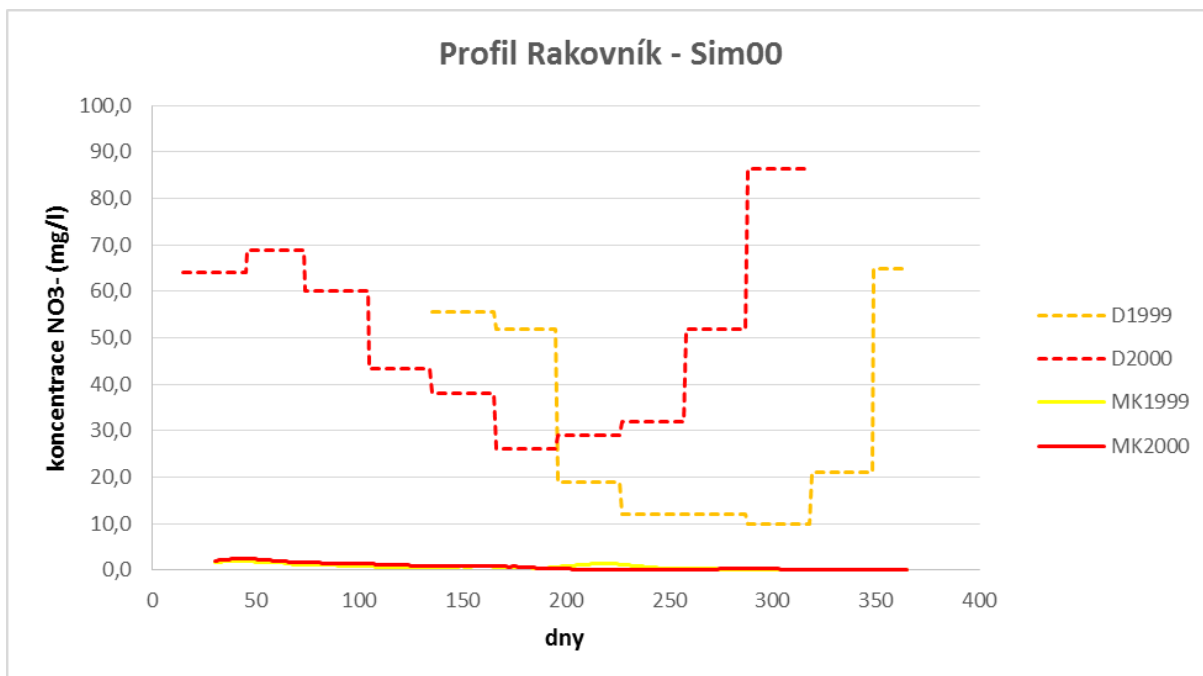
Byly provedeny 3 simulace v závislosti na vstupních údajích:

- 1) Varianta bez bodových a plošných zdrojů znečištění
- 2) Varianta s plošnými zdroji znečištění
- 3) Varianta s konstantními bodovými zdroji a hospodařením

4.1 Varianta bez bodových a plošných zdrojů znečištění

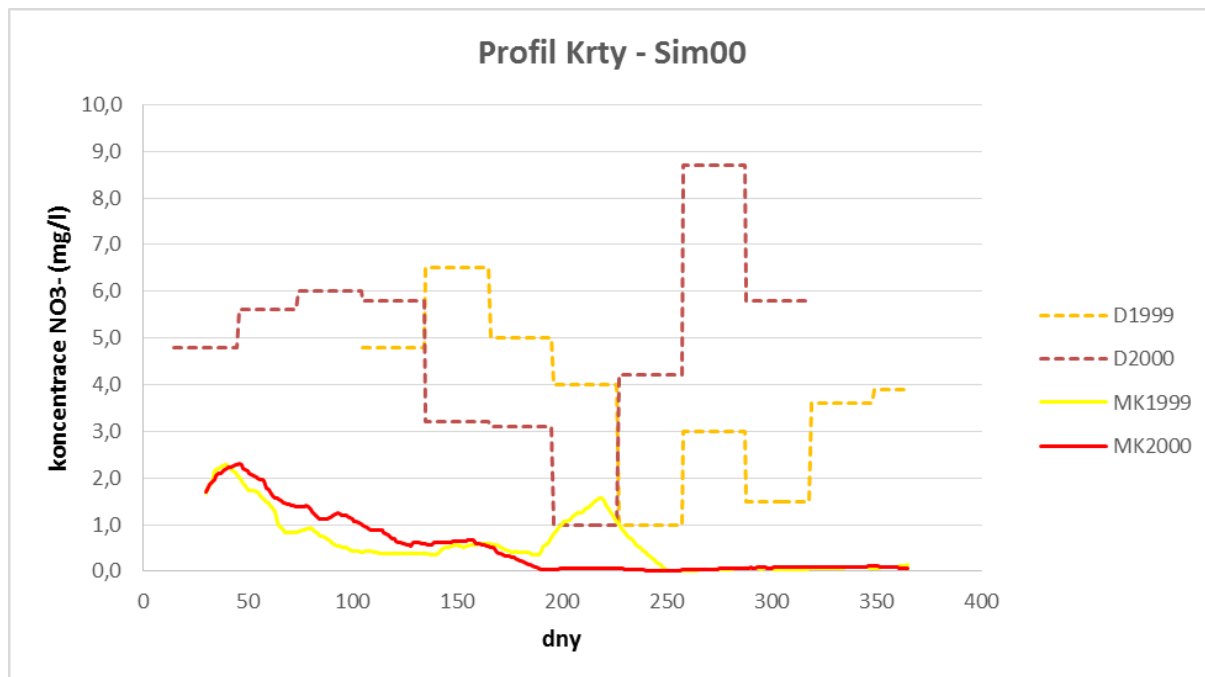
Pro vytvoření výstupů byla nejdříve uvažována varianta bez bodových a plošných zdrojů znečištění. Tyto grafy dokládají fakt, že koncentrace dusičnanů jsou antropogenně ovlivněny a přirozené koncentrace ve vodách dosahují maximální koncentraci 5 mg.l^{-1} .

V části Výsledky a diskuze jsem se soustředila na profil Rakovník, jelikož tvoří hlavní průmyslové centrum celé oblasti, grafy ostatních osmi profilů jsou uvedeny v příloze. Všechny grafy bez bodových a plošných zdrojů znečištění měly obdobný charakter s velmi nízkými modelovanými hodnotami.



Graf č. 2: Koncentrace NO_3^- v profilu Rakovník neuvažující bodové ani plošné zdroje znečištění

Křivky D1999 a D2000 označují naměřená data v roce 1999 resp. 2000. Křivky MK1999 a MK2000 pak patří ke klouzavým průměrům modelovaných hodnot pro daný profil.



Graf č. 3: Koncentrace NO₃⁻ v profilu Krty neuvažující bodové ani plošné zdroje znečištění

4.2 Varianta s plošnými zdroji znečištění

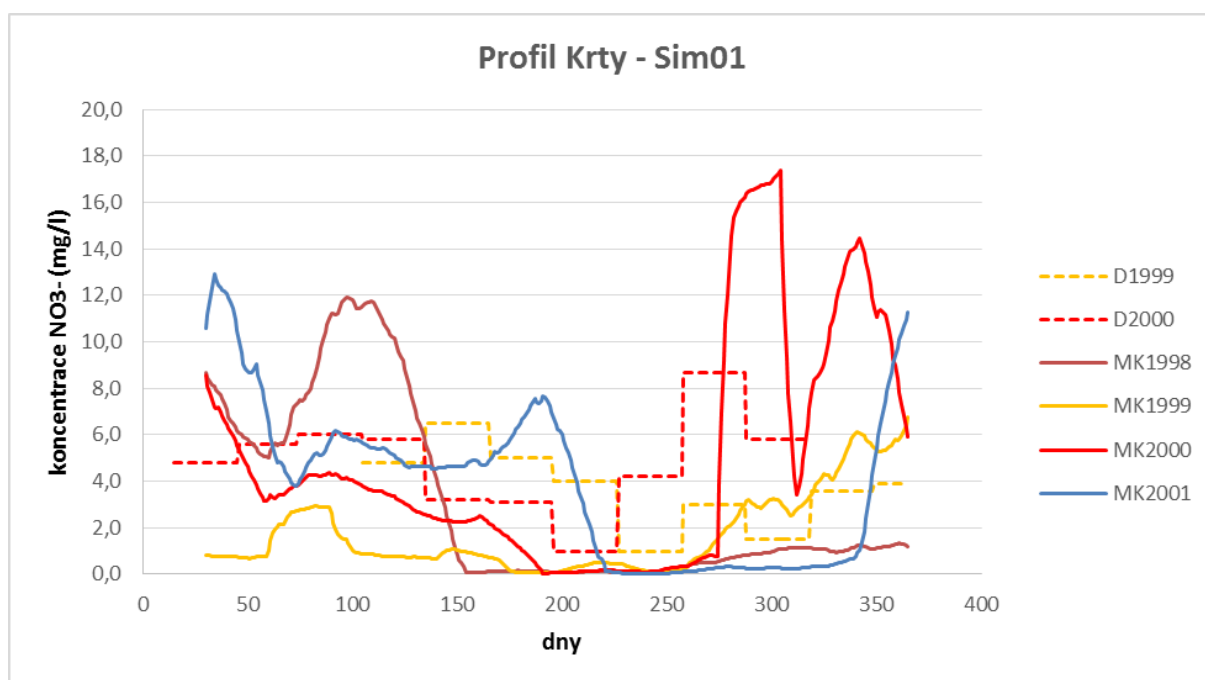
Dále byly vytvořeny grafy uvažující plošné zdroje znečištění pocházející ze zemědělství, konkrétně z hnojení dusíkatými hnojivy. Pro tuto variantu bylo pro zemědělské plochy (v mapě land use označeny AGRL) zvoleno hnojení popsané v níže uvedené tabulce.

Tabulka č. 5: Specifikace managementu na zemědělském půdním fondu – Simulace 01

Simulace 01		
rok	měsíc	management
1998	3	30kgN/ha
1998	4	pěstování obiloviny
1998	9	sklizeň
1999	3	120kgN/ha
1999	4	pěstování kukuřice
1999	9	sklizeň

2000	3	30kgN/ha
2000	4	pěstování obiloviny
2000	9	sklizeň
2000	10	100kgN/ha
2001	3	pěstování brambory
2001	9	sklizeň

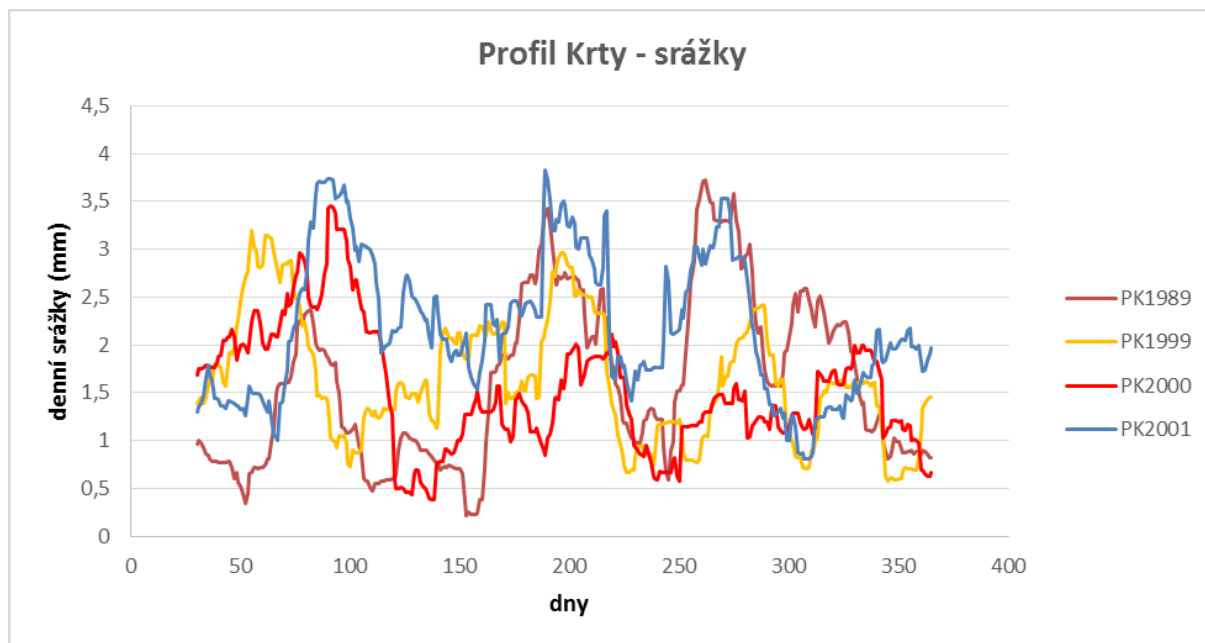
V grafu jsou zřetelné rozdíly v množství aplikovaných hnojiv i jednotlivých plodin. Jarní hnojení nám zobrazí pík kolem 90. - 100. dne v roce. Například 30 kg N/ha aplikovaných ve 3. měsíci roku 1998 zvedlo koncentrace dusičnanů v toku asi 3x méně ve srovnání s hnojením 120 kg N/ha ve stejném období roku 1999. Největší nárůst způsobila hnojiva aplikovaná v 10. měsíci roku 2000, pravděpodobně již nedochází k tak intenzivní denitrifikaci. Dále se zde uplatňují meteorologické aspekty, především srážky, které mají vliv na zvýšení koncentrací vlivem splachu z polí.



Graf č. 4: Koncentrace NO_3^- v profilu Krty s plošnými zdroji znečištění

Zkratkami MK1998 – MK2001 jsou označeny klouzavé průměry modelovaných hodnot za jednotlivé roky. PK1998 až PK2001 značí denní úhrny srážek.

U profilu Krty byly v předchozím případě koncentrace velice nízké. U tohoto profilu dochází k dominantnímu znečištění z plošných zdrojů.



Graf č. 5: Denní srážky na profilu Krty

Zvýšení koncentrace dusičnanů vlivem srážko-odtokové epizody sledujeme převážně u ploch zemědělského charakteru. Při vyšším zastoupení stabilních krajinných struktur, jako jsou například les či travní porosty, dochází k výraznému snížení změn dusičnanových aniontů v průběhu srážko-odtokových událostí.

4.3 Varianta s bodovými zdroji a hospodařením

V porovnání s předchozím krokem jsou zde přidány bodové zdroje znečištění – města, která byla rozdělena do 6 kategorií podle počtu obyvatel. Oproti grafu obsahujícímu jen plošné zdroje znečištění je zde vidět určitá variabilita a náznak sinusoidního průběhu koncentrací dusičnanů. I když se roční průběh koncentrací dusičnanů poněkud liší, model poskytuje maximální a minimální hodnoty odpovídající měřením.

Zdroje byly upraveny podle dvou scénářů, které zobrazují níže uvedené tabulky:

Tabulka č. 6: Specifikace managementu na zemědělském půdním fondu – Simulace 02

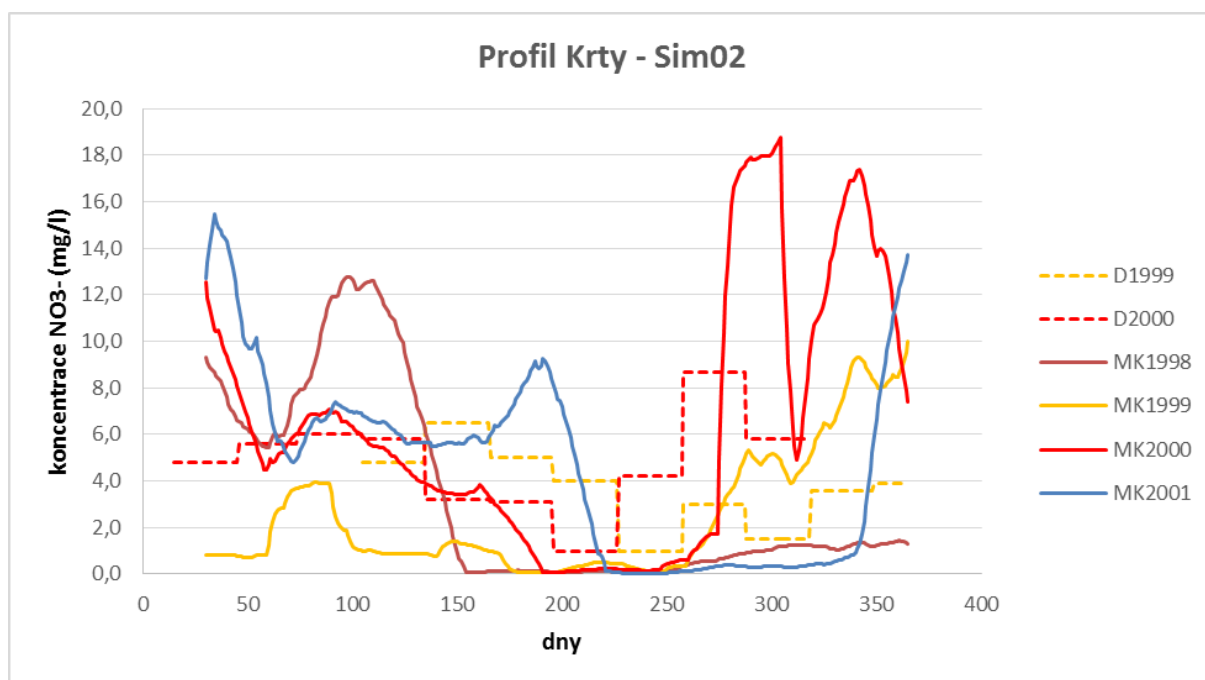
Simulace 02

rok	měsíc	management
1998	3	30kgN/ha
1998	4	pěstování obiloviny
1998	9	Sklizeň
1999	3	180kgN/ha
1999	4	pěstování kukuřice
1999	9	Sklizeň
2000	3	60kgN/ha
2000	4	pěstování obiloviny
2000	9	Sklizeň
2000	10	100kgN/ha
2001	3	pěstování brambory
2001	9	Sklizeň

Tabulka č. 7: Specifikace managementu na zemědělském půdním fondu – Simulace 03

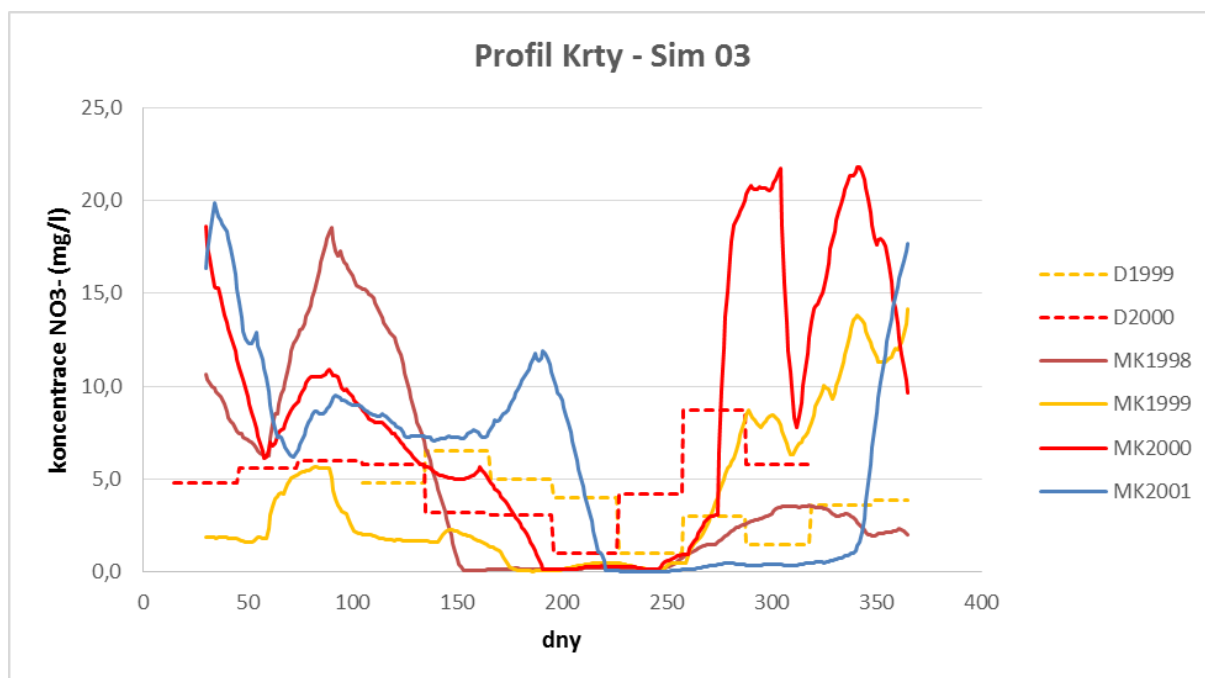
Simulace 03

rok	měsíc	management
1998	3	100kgN/ha
1998	4	pěstování obiloviny
1998	9	Sklizeň
1999	3	200kgN/ha
1999	4	pěstování kukuřice
1999	9	Sklizeň
2000	3	100kgN/ha
2000	4	pěstování obiloviny
2000	9	Sklizeň
2000	10	100kgN/ha
2001	3	pěstování brambory
2001	9	Sklizeň



Graf č. 6: Výsledek simulace Sim02 na profilu Krty

D1999 jsou naměřená data z roku 1999, D2000 patří k datům měřeným v roce 2000.



Graf č. 7: Výsledek simulace Sim03 na profilu Krty

Změna managementu se projevila ve zvýšení maximálních koncentrací dusičnanů. V Simulaci02 s menší dávkou hnojiv jsou maximální koncentrace kolem 19 mg.l⁻¹, v druhém případě (Sim03) dosahují až 23 mg.l⁻¹. Roční průběh je stejný z důvodu totožného působení ostatních faktorů.

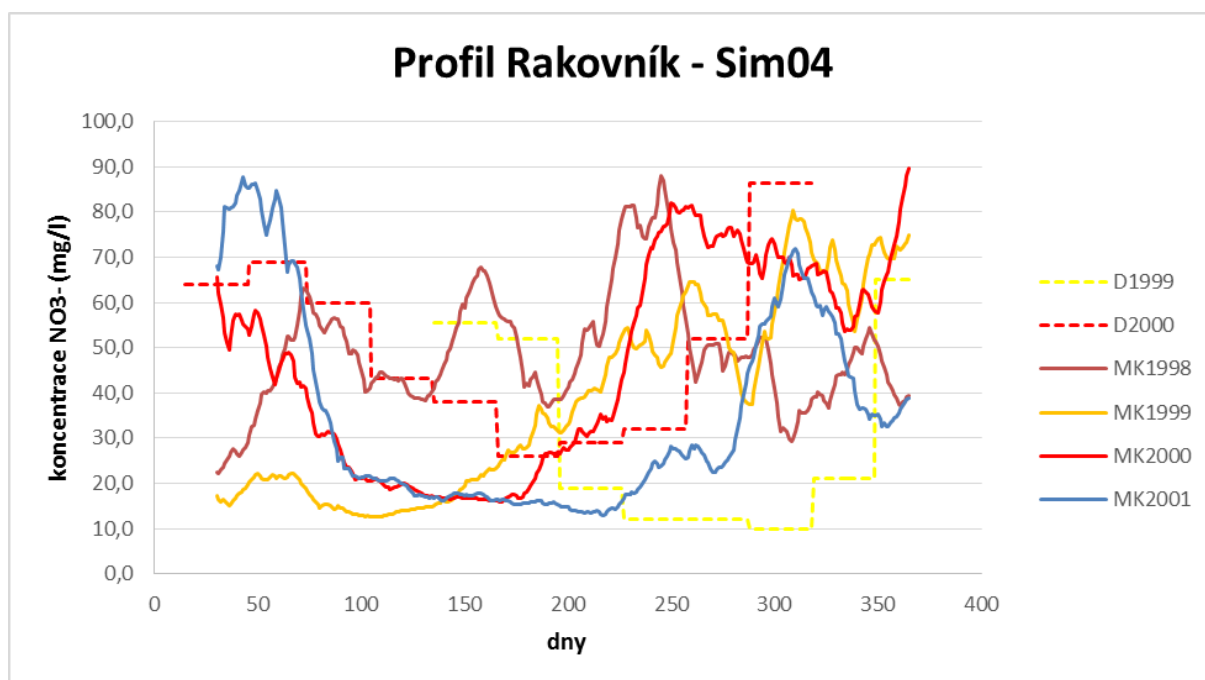
Mezi ostatní faktory řadíme srážky, sklizeň plodin, svažitost povodí, teplotu vzduchu, erozi, vegetaci a půdní pokryv, jak popisuje i Christopher et al. (2008).

Poslední variantou jak odzkoušet citlivost modelu tentokrát na bodové zdroje znečištění bylo vytvoření časového průběhu znečištění na bodovém zdroji Rakovník. Bodové zdroje jsou oproti plošným snadněji lokalizovatelné a je možné snadněji posoudit jejich vliv na jakost povrchových i podzemních vod.

Roční průběh zobrazuje níže uvedená tabulka, kromě NO₃⁻, jejichž průběh byl ve všech předchozích případech konstantní, došlo také k navýšení organického dusíku.

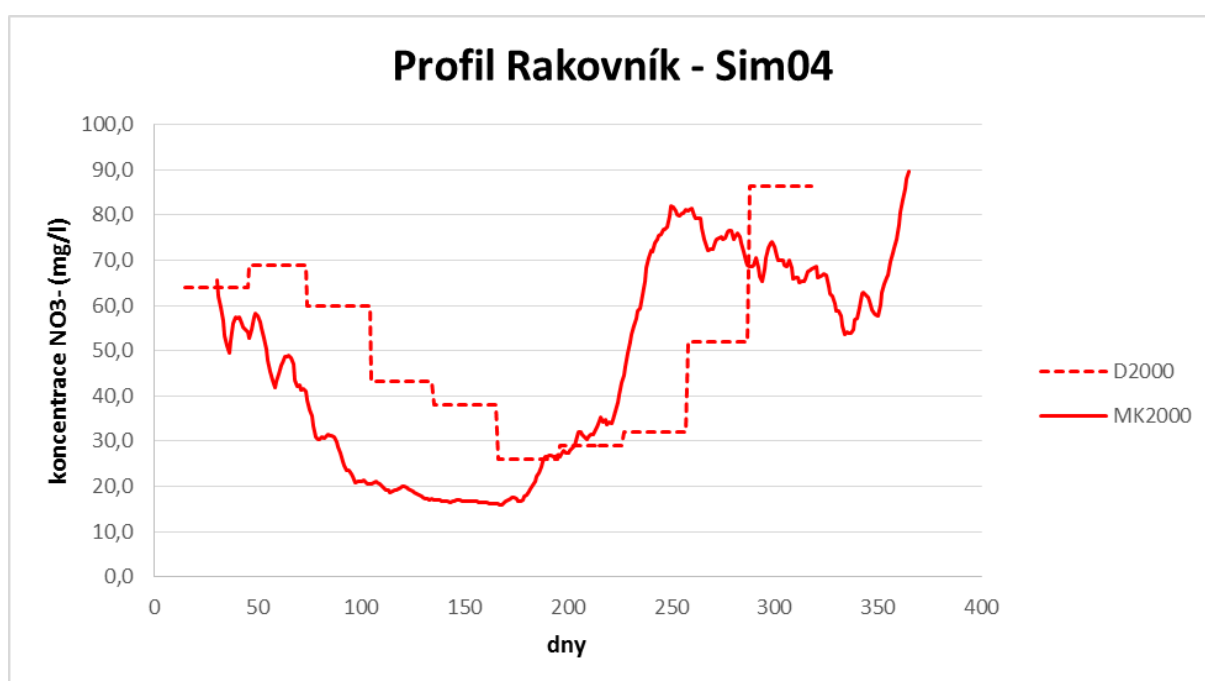
Tabulka č. 8: Úprava bodového zdroje Rakovník – Simulace 04

<i>Bodový zdroj Rakovník- Sim04</i>	
měsíc	množství vypuštěného NO3 (kg/měsíc)
leden	250,0
únor	700,0
březen	1000,0
duben	1000,0
květen	700,0
červen	250,0
červenec	250,0
srpen	250,0
září	250,0
říjen	250,0
listopad	250,0
prosinec	250,0



Graf č. 8: Výsledek simulace Sim04 na profilu Rakovník

Několikanásobně zvýšené hodnoty v březnu a dubnu měly vyrovnat značný jarní pokles, čehož se podařilo docílit. Sinusoidní průběh koncentrace dusičnanů byl zachován. Nejblíže měřeným hodnotám jsou modelované hodnoty z roku 2000.



Graf č. 9: Profil Rakovník – modelované a měřené hodnoty v roce 2000

Ve většině modelovaných případů se mi podařilo dosáhnout přibližně stejných maximálních hodnot v porovnání s měřenými hodnotami. Na začátku kalibrace však docházelo k podhodnocování dusičnanových aniontů, dokud nebyly vhodně upraveny bodové zdroje znečištění. Tento problém popisují i další autoři – Grizzetti et al. (2005), Kadlec (2007) i autoři projektu EUROHARP na Želivce. Nízké koncentrace se vyskytují v měsících únor až květen, což si vysvětlují zvýšenými srážkami v tomto období a také faktem, že dusičnany jsou spotřebovávány vegetací pro růst. Tyto hypotézy potvrzují i níže uvedení autoři.

Velký vliv vegetace na koncentrace dusičnanů dokládají ve svých pracích také Kvítek et al. (1999), Neill (1989) či Moravcová (2011). Velká srážko-odtoková událost se pak podílí dle Ramose a Martinéze (2009) na větším odnosu dusičnanového a amonného iontu z povodí. Koncentrace dusičnanů mají v průběhu roku sinusoidní průběh, v zemědělsky využívaných povodích jsou zpravidla koncentrace dusíku a odnosy dusičnanů nejvyšší na jaře – Doležal et al. (2006), Moravcová (2011), McDonnell et al. (2007). Tyto sezónní trendy jsou vázané také na průtok, kdy se vysoká míra odnosu dusičnanů objevuje v předjaří a v období s vysokým průtokem (Schilling, 2002).

Koncentrace dusíku jsou vyšší v povodích se zemědělským využitím a se zastoupením průmyslu. Zlepšující efekt na koncentrace dusičnanů ve vodách mají přirozené lesy a louky (Kvítek et al., 2009) a (Tong a Chen, 2002).

5. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo modelování povrchového znečištění Rakovnického potoka dusičnany. Pro zjištění citlivosti modelu na vstupní údaje bylo provedeno několik simulací – bez bodových a plošných zdrojů znečištění, s plošnými zdroji znečištění a s plošnými i bodovými zdroji znečištění. Plošné zdroje znečištění byly dále rozděleny do 3 kategorií podle množství a termínu hnojení. Charakterizace bodových zdrojů byla upravena dle počtu obyvatel.

Počáteční výsledky se hodně lišily od měření, proto jsem se rozhodla zvolit manuální kalibraci parametrů. Cílem nebylo dosáhnout shodných hodnot jako v měření, ale odhadnout klíčové parametry a vstupy do složitého a komplexního koloběhu dusíku. Jak dokázaly výsledky, lze lepších výstupů kalibrace dosáhnout vhodným upravením bodových zdrojů znečištění. Při změnách plošných zdrojů znečištění dochází ke změnám převážně v zemědělských oblastech, jako reprezentativní profil pro tuto oblast byly zvoleny Krty.

Na výsledku modelování se ještě podílela řada dalších faktorů, jako jsou srážky, svažitost terénu, eroze, půdní pokryv, atd.

V tomto kroku bych ráda zdůraznila, že hodnoty měření na jednotlivých profilech mohou být také zatíženy určitou chybou, protože měření nebylo kontinuální, ale docházelo k němu náhodně vybraný den v měsíci.

Vzhledem k antropogenním zásahům provedeným na Rakovnickém potoce, které kvalitu toku značně ovlivňují, lze celkově model hodnotit jako účinný nástroj k odhadu celkového množství koncentrací dusičnanů.

Zdroje:

ABBASPOUR, K. C., VAN GENUCHTEN, M. T., SCHULIN, R., SCHLÄPPI, E. 1997. A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. *Water Resources Research* 33. Str. 1879-1892.

ARNOLD, J. G., FOHRER, N. (2005): SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes* 19. Str. 563-572.

ARNOLD, J., DI LUZIO, M., SRINIVASAN, R., WINCHELL, M. (2007): ArsSWAT Interface for SWAT2012. Blackland Research Center, Texas agricultural Experiment Station, Texas, 436 str.

BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F., MONKE, E. J. (1980): ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of ASAE* 23. str. 938-944.

BECKER A., SERBAN P. (1990): Hydrological Models for Water Resources System Design and Operation. WMO Report No. 740, 64 str.

BENEŠOVÁ, L., MATĚJČEK, L., MATOUŠKOVÁ, M., TONIKA, J., POPELÁKOVÁ, B. (2001): Ekologické hodnocení kvality vody v malých povodích: Rakovnický potok, GAUK č. 131/1998.

BINGER, R. L., THEURER, F. D. (2001): AnnAGNPS Technical processes: Documentation version 2. USDA ARS. 146 str.

BORAH, D. K., XIA, R., BERA, M. (2002): Watershed model to study hydrology, sediment and agricultural chemicals in rural watersheds. *Surface Water Hydrology* Vol. 1., str. 343-358.

BOURAOUI F., GRIZZETTI, GRANLUND, K., REKOLAINEN, S., BIDOGLIO, G. (2004): Impact of climate change on the water cycled and nutrient losses in a Finnish catchment. *Clim. Change* 66: str. 109-126.

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD (2003): Sčítání lidu, domů a bytů k 1.3.2001 – Základní informace o okresech a krajích, dostupné 1.5.2013 na: [http://www.czso.cz/sldb2011/redakce.nsf/i/zakladni_informace_o_okresech_a_krajich/\\$File/e-4107-03.pdf](http://www.czso.cz/sldb2011/redakce.nsf/i/zakladni_informace_o_okresech_a_krajich/$File/e-4107-03.pdf)

ČHMÚ (2012): Předpovědní systém HYDROG (online 1.5.2013 dostupné na <http://voda.chmi.cz/pov06/pdf/c52.pdf>)

DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEŽULÁK, J. (2003): Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZÚ, Praha. 214 str.

DesQ-MaxQ (2010): Program DesQ-MaxQ (online 21.6.2013 dostupné na: <http://www.desq-maxq.cz/index.html>)

DHI (2010): DHI, a.s. (online 2.5.2013 dostupné na www.dhi.cz)

DI LUZIO, M., SRINIVASAN, R., ARNOLD, J. G. (2002): Integration of watershed tools and SWAT model into BASINS. J. Amer. Water Resour. Assoc. 38(4): str. 1127-1141.

DiLUZIO, M., ARNOLD, J. G., SRINIVASAN, R. (2005) Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. Hydrological Processes 19., str. 629-650.

DOLEŽAL, F., KULHAVÝ, Z., KVÍTEK, T., SOUKUP, M., ČMELÍK, M., FUČÍK, P., NOVÁK, P., PETERKOVÁ, J., PILNÁ, E., PRAŽÁK, P., TIPPL, M., UHLÍŘOVÁ, J., ZAVADIL, J. (2006): Hydrologický výzkum v malých zemědělských povodích. Journal of Hydrology and Hydromechanics 54. str. 229.

EUROHARP (2009): NL-CAT application to six European catchments, Alterra-rapport 1205

GASSMAN, P. W., GREEN, C. H., ARNOLD, J. G. (2007): The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Ames: Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University. 100 str.

GRIZZETTI, B., BOURAOUI, F., MARSILY, G. (2005): Modelling nitrogen pressure in river basins: A comparison between a statistical approach and the physically-based SWAT model. Physics and Chemistry of the Earth 30, str. 508-517.

GRODA, B., VÍTEŽ, T., MACHALA, M., FOLLER, J., SURÝNEK, D., MUSIL, J. (2007): Čištění odpadních vod jako nástroj k ochraně životního prostředí v zemědělské praxi a na venkově. MZE, Praha, 57 str.

HAGEMANN, S., GOTTEL, H., JACOB, D., LORENZ, P., ROECKNER, E. (2009): Improved regional scale processes reflected in projected hydrological changes over large European catchments, Clim. Dynam., 32, str. 767-781.

HRÁDEK, F., KUŘÍK, P. (2001): Maximální odtok z povodí – teorie svahového odtoku a hydrologický model DesQ-MaxQ, ČZÚ v Praze.

Hydrotec, GmbH (2003): Dokumentation zu Niederschlag-Abfluss Modell NASIM. Hydrotec, Aachen, 557 str.

CHRISTOPHER, S. F., MITCHELL, M. J., McHALE, M. R., BOYER, E. W., BURNS, D. A., KENDALL, C. (2008): Factors controlling nitrogen release from two forested catchments with contrasting hydrochemical responses. *Hydrological Processes* 22:46-62.

JENÍČEK, M. (2009): Modelování srážko-odtokových procesů na malých a středně velkých povodích. Povodně a změny v krajině. PřF UK, Praha. str. 101-109.

JOHANSON, R. C., IMHOFF, J. C., DAVIS, H. H. (1980): User's manual for the Hydrologic Simulation Program – Fortran (HSPF). Athens.

JUST, T. (1996): Odtoky znečištění z obcí do 500 obyvatel, SOVAK č. 5, Praha, str. 7-8.

KADLEC, J. (2007): Modelování erozních procesů v povodí Blšanky, PřF UK, 93 str.

KACHLÍK, V. (2001): Základy geologie. Praha Karolinum, 342 str.

KOLBEK, J. (1996): Změny vegetace po 20 letech na některých lokalitách Křivoklátska. *Příroda*, Praha, 5: str. 85-102.

KOLBEK, J., BRABEC, E. (1998): Rozšíření zvláště chráněných druhů rostlin v CHKO a Biosférické rezervaci Křivoklátsko. – *Příroda*, 12: Praha, str. 53–98

KOŠKOVÁ, R., NĚMEČKOVÁ, S. (2009): Assessment of Evaporation Simulation in the Malše Basin. *Soil&Water Research*, 4, 2, str. 111 – 122.

KRAUSE, P., BOYLE, D.P., BÄSE, F. (2005): Comparison of different efficiency kriteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5 (2005), str. 83 - 87.

KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ, P. (2002): Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP, Praha. 123 str.

KOVÁŘ, P. (2006): The extent of land use impact on water régime. *Plant, Soil and Environment*, 52, 6, str. 239 – 244.

KVÍTEK, T. (1999): Development of nitrate concentrations and analysis of stability of agricultural water basins of storage reservoir Švihov. *Rostlinná výroba* 45. str. 107–111.

LAURENT, F., RUELLAND, D. (2011): Assessing impacts of alternative land use and agricultural practices on nitrate pollution at the catchment scale. *Journal of Hydrology* 409, str. 440-450.

LEAVESLEY, G. H., LICHTY, R. W., TROUTMAN, B. M., SAINDON, L. G. (1983): *Precipitation Runoff Modeling System – User's Manual*. Washington, D.C.

LEONARD, R. A., KNISEL, W. G., STILL, D. A. (1987): GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of ASAE* 30. str. 1403-1418.

LOŽEK, V. (1975): Přehled měkkýšů Křivoklátska. – *Bohemia centralis*, 4: Praha str. 104–131

- MAGUIRE, J., D., BATTY, M., GOODCHILD, M., F. (2005): GIS, Spatial Analysis and Modeling. ESRI Press, California. 480 str.
- MATOUŠKOVÁ, M. (2003): Ekohydrologický monitoring vodních toků jako podklad pro revitalizaci vodních ekosystémů. Disertační práce. PřF UK v Praze, Praha, 219 str.
- MORAVCOVÁ, J. (2011): Vliv krajinných struktur na vybrané ukazatele jakosti vody při zvýšených průtocích jako podklad pro projekci KPÚ, JČU, České Budějovice, 146 str.
- NASR, A., BRUEN, M., JORDAN, P., MOLES, R., KIELY, G., BYRNE, P. (2007): A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. Water resources research 41 (5) (2007), str. 1065 - 1073.
- NEILL, M. (1989): Nitrate concentrations in river waters in the south-east of Ireland and their relationship with agricultural practice. Water Research 11. str. 1339-1355.
- PISINARAS, V., PETALAS, CH., GIKAS, G., GEMITZI, A., TSIHRINTZIS, V. (2010): Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Desalination 250, str. 274-286.
- PITTER, P. (2009): Hydrochemie. Praha: Vydavatelství VŠCHT. 573 str.
- PITTER, P. (2002): Zdroje a odstraňování nutrientů. Vodní hospodářství. 2002, roč. 52 č. 2, str. 29-31
- POOR, C. J., McDONNELL, J. J. (2007): The effects of land use on stream nitrate dynamics. Journal of Hydrology 332. str. 54-68.
- QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti ČSSR. Studia Geographica 16, Geografický ústav ČSAV, Brno. 79 str.
- QUERNER, E. P., ZANEN, M. (2013): Modelling water quality and quality using SWAT – A case study in the Limpopo River basin, South Africa, Alterra Report, Wageningen, 73str.
- RAMOS, M. C. MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. (2009): Impacts of annual precipitation extremes on soil and nutrient losses in vineyards of NE Spain. Hydrological Processes 23. str. 224-235.
- REED, S. M., KOREN, V.I., SMITH, M. B., ZHANG, Z., MOREDA, F., SEO, D. (2004): Overall distributed model intercomparison project results. Journal of Hyrology, 298, str. 27-60.
- SCHILLING, K. E. (2002): Chemical transport from paired agricultural and restored prairie watersheds. Journal of Environmental Quality 31. 1184-1193
- SMITH, R. E., GOODRICH, D. C., WOOLHISER, D. A., UNKRICH, C. L. (1995) KINEROS – A kinematic runoff and erosion model. In: Singh, V.P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch, Colorado. Str. 697-732.

SUI, D.Z., MAGGIO, R.C. (1999): Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, str. 33-51.

ŠÍMA, J. (2003): Geoinformační terminologie pro geodety a kartografy. Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický (VÚGTK). Zdíby.

ŠIMEK, M., COOPER, J. E. (2004): Biogeochemical cycles of elements. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. 64 str.

ŠÍR, B., RICHNAVSKÝ, J., BOBÁL, P., UNUCKA, J., ĎURICHA, M., PODHORÁNYI, M. (2010): Sediment transport modelling within small catchments of Beskydy Mts. Česká geografická společnost, Ostrava, str. 208-214.

TONG, S. T. Y., CHEN, W. (2002): Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management* 66. 377–393.

WFD (Water Framework Directive) 2000/60/EC of the EP and of the Council of 23 October 2000 (2000): Official Journal of the European Communities, L, 327/1. Luxembourg

WHEATER, H. S. (2005): Introduction to the GWADI Modelling. GWADI.

WHO – Progress on Drinking Water and Sanitation, 2012 update, dostupné 27.3.2013 na: http://whqlibdoc.who.int/publications/2012/9789280646320_eng_full_text.pdf

YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D., ANDERSON, W. P. (1987): AGNPS. Agricultural nonpoint – source pollution model: A watershed analytical tool. Conservation Research Report No. 35. Washington D.C.: USDA.

Seznam obrázků

Obr. č. 1: Klasifikace hydrologických modelů.....	5
Obr. č. 2: Typy vazeb mezi GIS a hydrologickými modely.....	19
Obr. č. 3: Cyklus dusíku.....	22
Obr. č. 4: Povodí Rakovnického potoka se znázorněním odběrových profilů.....	32
Obr. č. 5: Program SPAW – výpočet fyzikálních vlastností půdy.....	38
Obr. č. 6: Tabulka pro skot.....	41
Obr. č. 7: Tabulka pro prasata.....	41
Obr. č. 8: Watershed Delineation.....	45
Obr. č. 9 : Land use.....	46
Obr. č. 10: Mapa půd vytvořená na základě půdních sond z VÚMOP.....	46

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Popis vstupních dat do modelu SWAT.....	24
Tab. č. 2: Základní fyzicko-geografická charakteristika povodí Rakovnického potoka.....	27
Tab. č. 3: Specifikace půdních sond.....	37
Tab. č. 4: Klimatická charakteristika oblasti.....	39
Tab. č. 5: Specifikace managementu na zemědělském půdním fondu – Simulace 01.....	48
Tab. č. 6: Specifikace managementu na zemědělském půdním fondu – Simulace 02.....	51
Tab. č. 7: Specifikace managementu na zemědělském půdním fondu – Simulace 03.....	51
Tab. č. 8: Úprava bodového zdroje Rakovník – Simulace 04.....	53

Seznam grafů

Graf č. 1: Rozdělení zemědělské půdy v povodí Rakovnického potoka.....	36
Graf č. 2: Koncentrace NO_3^- v profilu Rakovník neuvažující bodové ani plošné zdroje znečištění.....	47
Graf č. 3: Koncentrace NO_3^- v profilu Krty neuvažující bodové ani plošné zdroje znečištění.....	48
Graf č. 4: Koncentrace NO_3^- v profilu Krty s plošnými zdroji znečištění.....	49
Graf č. 5: Denní srážky na profilu Krty.....	50
Graf č. 6: Výsledek simulace Sim02 na profilu Krty.....	52
Graf č. 7: Výsledek simulace Sim03 na profilu Krty.....	52
Graf č. 8: Výsledek simulace Sim04 na profilu Rakovník.....	54
Graf č. 9: Profil Rakovník – modelované a měřené hodnoty v roce 2000.....	54